

ترمودینامیک ۲

آموزشکده فنی شهید جباریان

مدرس: سمیرا اردکانی

گروه مکانیک

سر فصل ها

فصل اول: قانون دوم ترمودینامیک

فصل دوم: سیستم های توان و سرمایه‌ش

فصل سوم: روابط ترمودینامیکی

فصل چهارم: مخلوط ها و محلول ها

فصل پنجم: سوخت و احتراق

فصل اول:

قانون دوم ترمودینامیک

مفهوم قانون دوم ترمودینامیک:

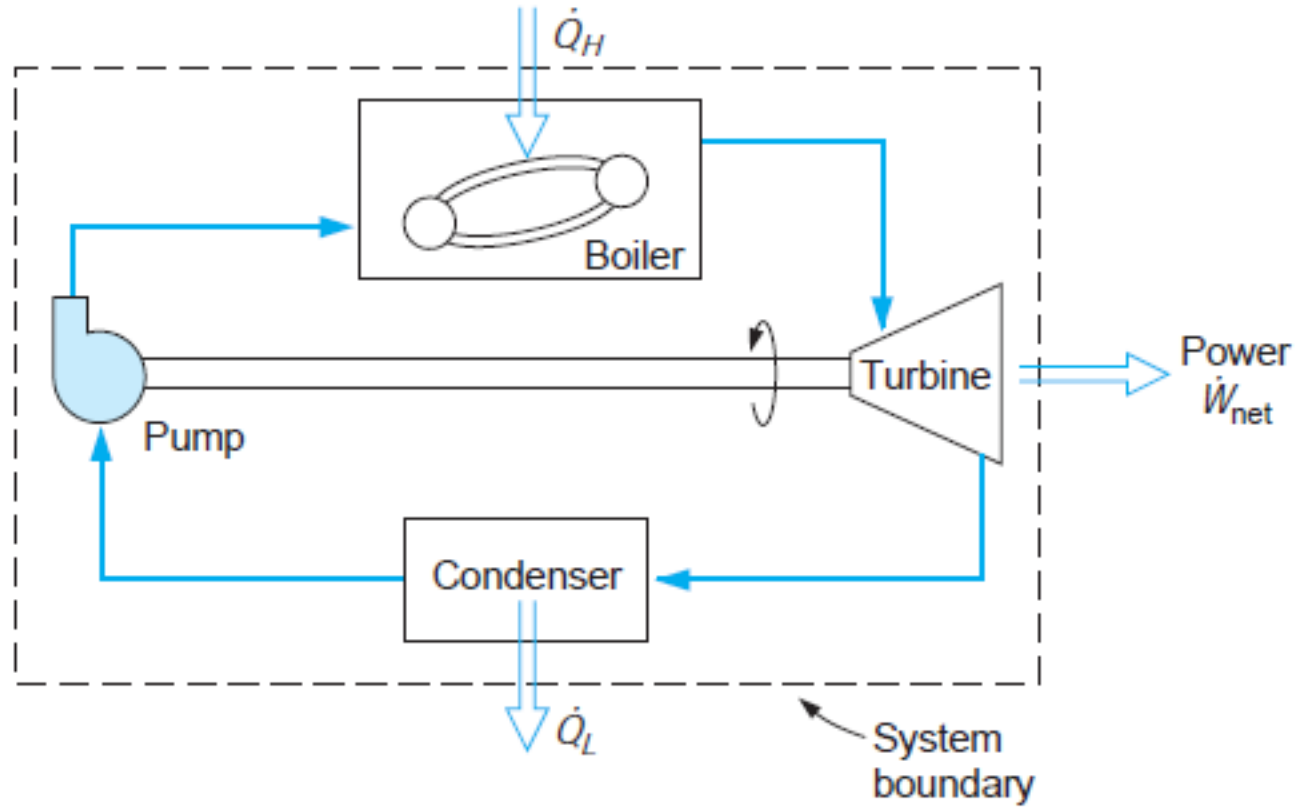
بر اساس قانون دوم ترمودینامیک یک فرآیند می تواند در یک جهت انجام شود، ولی در جهت عکس انجام پذیر نیست.

مثال: یک فنجان چایی داغ با تبادل حرارت با محیط افراد سرد می شود ولی گرما از محیط به فنجان چایی منتقل نمی شود.

موتور گرمایی: دستگاهیست که در یک چرخه ترمودینامیکی کار کرده و در راستای انتقال گرما از جسم دما بالا به جسم دما پایین، کار خالص مثبت انجام می دهد.

مثال: موتورهای درون سوز و توربین های گاز

سیکل نیروگاه بخار: نمونه ای از موتورهای گرمایی است که فرآیندهای آن حالت پایا- جریان پایا هستند و سیال عامل آن بخار آب می باشد.



شکل ۱-۱: موتور گرمایی در فرآیند حالت پایا - جریان پایا

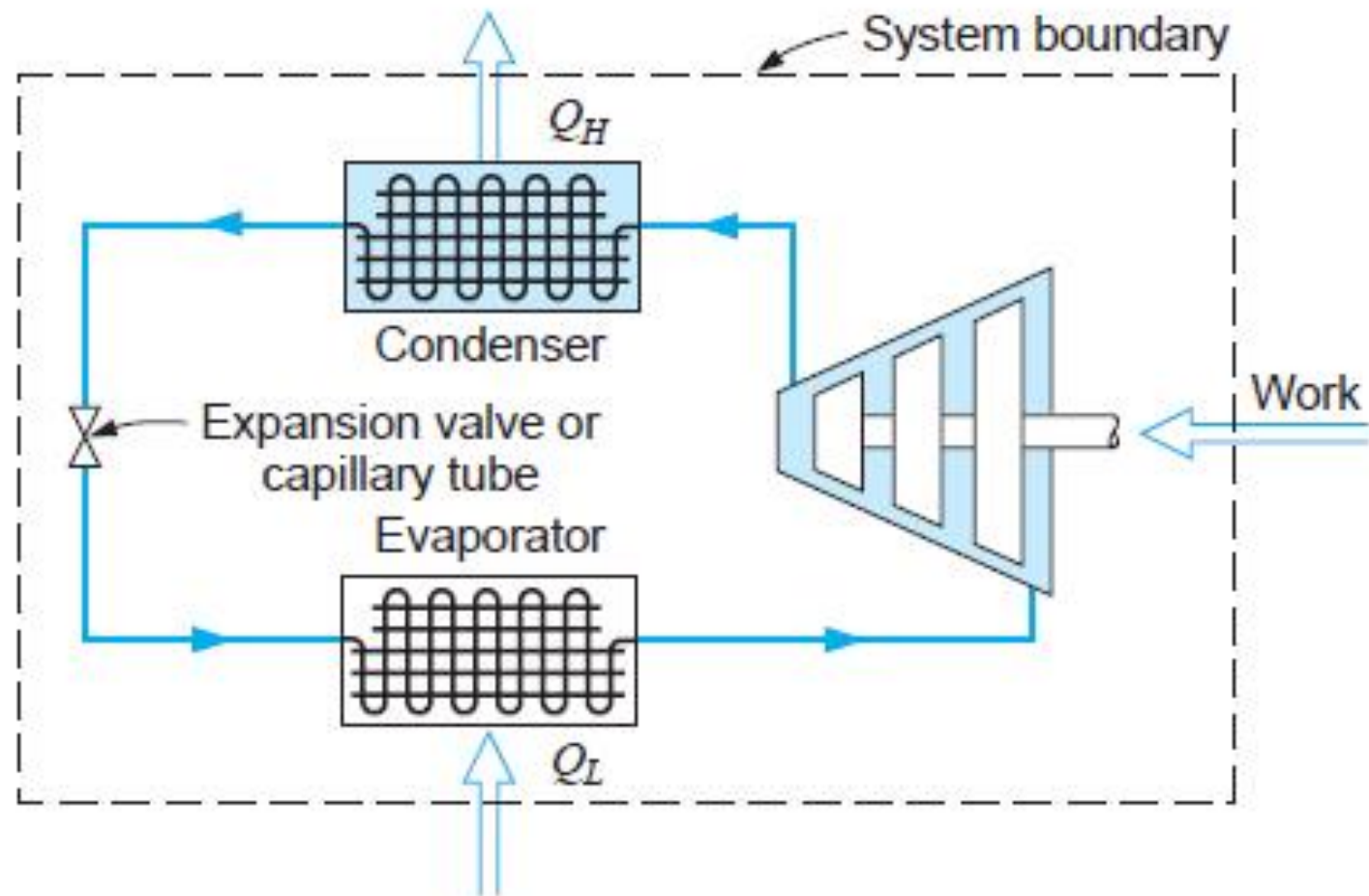
Q_H : انتقال گرما به (یا از) جسم دما بالا

Q_L : انتقال گرما به (یا از) جسم دما پایین

بازده موتور گرمایی: بازده عبارتست از نسبت خروجی (انرژی به دست آمده) به ورودی (انرژی هزینه شده)

$$\eta_{thermal} = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

سیکل یخچال یا پمپ گرمایی: این سیکل با امکان پذیر نبودن انتقال گرمای مستقیم از جسم دما پایین به جسم دما بالا همراه است. در این سیکل سیال عامل، یک سردساز همانند R-134a یا آمونیاک است که یک چرخه ترمودینامیکی را سپری می کند. گرما در تبخیر کننده به مبرد داده شده و مبرد درون تبخیر کننده دارای دما و فشار پایین است. در کمپرسور بر روی مبرد کار انجام شده و گرمای آن به چگالنده منتقل می شود، در چگالنده فشار و دما بالا است. هنگامی که مبرد از شیر فشار شکن یا لوله موئین گذر کند، فشار افت می کند.



شکل ۱-۲: سیکل تبرید

ضریب عملکرد برودتی یخچال:

در یخچال هدف Q_L یعنی همان انرژی گرفته شده می باشد که عبارتست از گرمای گرفته شده از فضای سرد و انرژی هزینه شده همان کار W می باشد. بنابراین ضریب عملکرد برودتی به صورت زیر تعریف

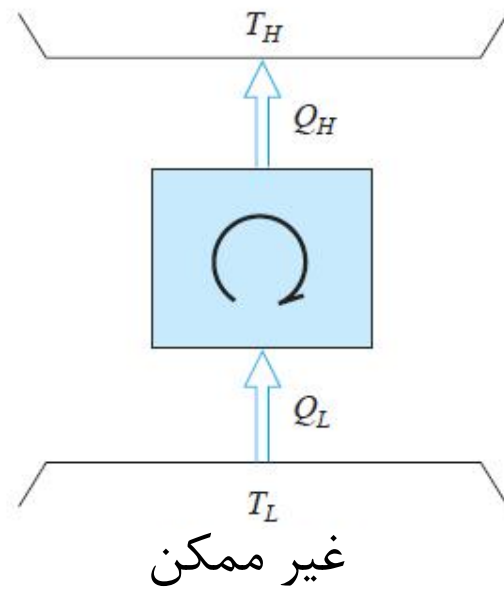
$$\beta = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1} \quad \text{می شود:}$$

پمپ گرمایی: اگر چرخه تبرید به منظور گرمایش به کار رود در این حالت هدف استفاده از گرمای Q_H منتقل شده از سردساز به جسم دما بالاست که در فضای گرم جای گرفته است. Q_L از زمین، هوای جو یا چاه آب به سردساز منتقل می شود و در این حالت نیز ضریب کارایی به صورت زیر تعریف می شود:

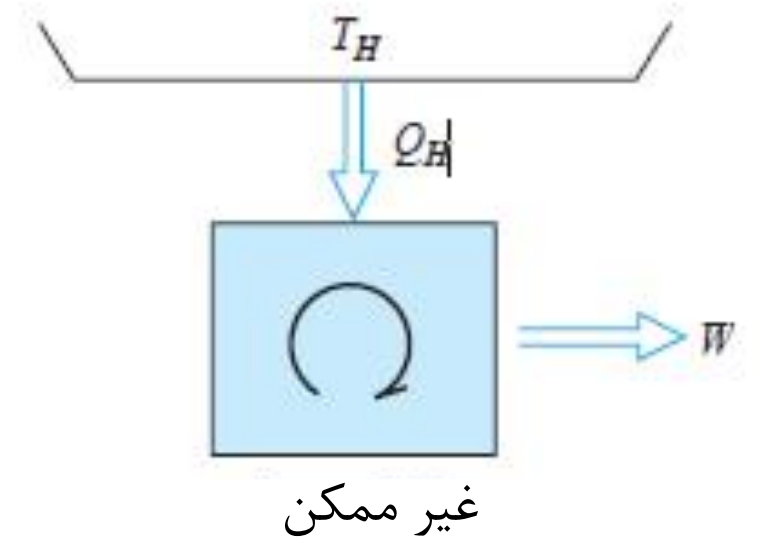
$$\beta' = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}}$$

قانون دوم ترمودینامیک: این قانون با دو بیان کلاسیک به صورت زیر تعریف می‌شود:

بیان کلوین پلانک: غیر ممکن است که سیستمی در یک چرخه کار کند و گرما را تنها از یک منبع گرمایی گرفته و به همان مقدار نیز کار تولید نماید و در موتورهای گرمایی داشتن راندمان ۱۰۰ درصد غیر ممکن است.



شکل ۴-۱: بیان کلازیوس



شکل ۳-۱: بیان کلوین پلانک

بیان کلازیوس: غیر ممکن است که سیستمی در یک چرخه کار کند، به طوری که تنها نتیجه عملکرد آن انتقال گرما از جسم سرد به جسم گرم باشد.

فرآیند برگشت پذیر: فرآیندی است که وقتی از یک حالت تعادل اولیه آغاز می‌شود در هر لحظه در طول فرآیند، هم سیستم و هم محیط در حال برهمکنش با آن، بتوانند به حالات اولیه شان بازگردند و به عبارت دیگر فرایندی که بدون برجای گذاشتن هیچ‌گونه اثری روی محیط، می‌تواند معکوس گردد.

عوامل اصلی برگشت ناپذیری:

- ۱- اصطکاک
- ۲- انبساط آزاد
- ۳- انتقال گرما به سبب اختلاف دمای محدود
- ۴- آمیختن دو ماده گوناگون
- ۵- احتراق

چرخه کارنو:

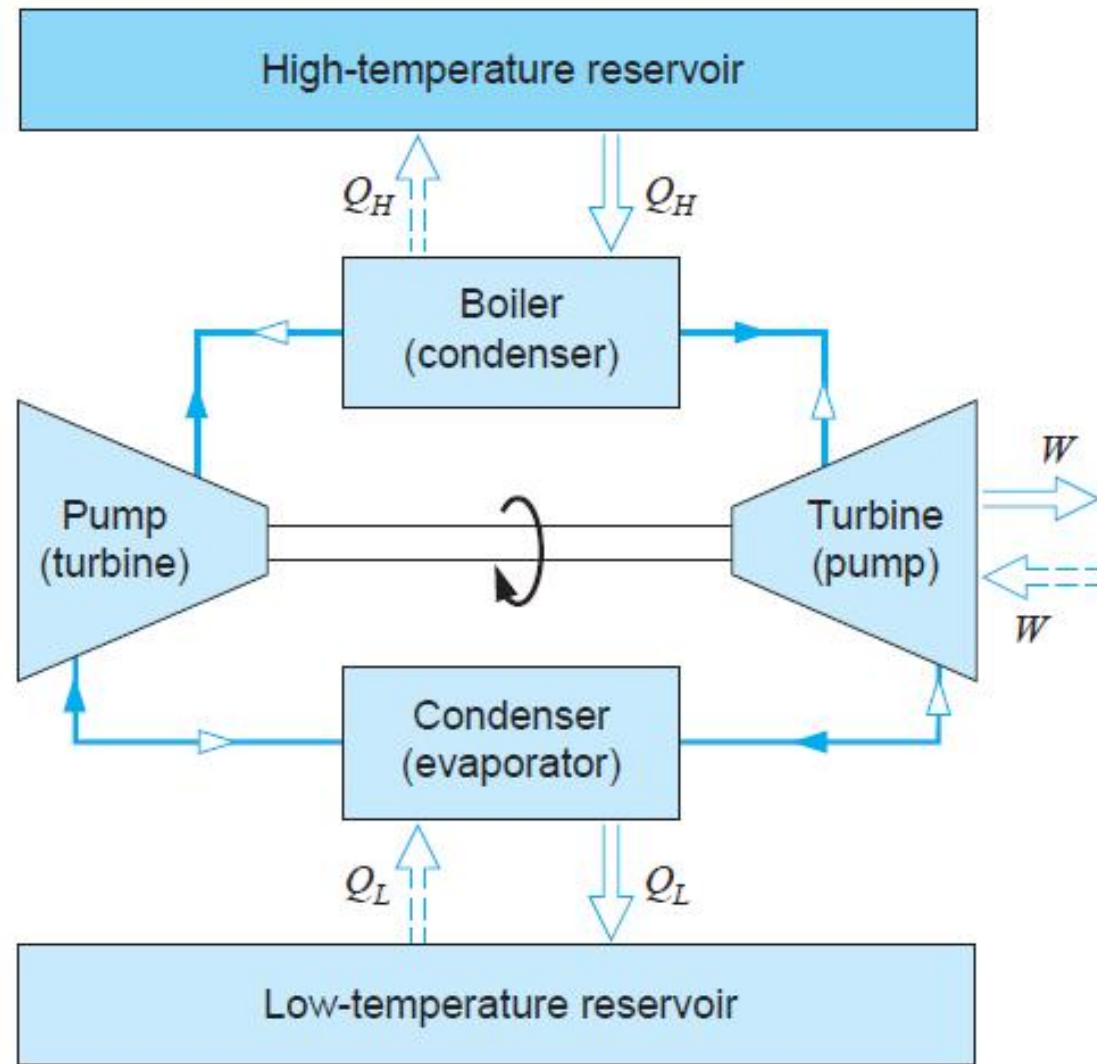
معروفترین چرخه برگشت پذیر است و از چهار فرآیند برگشت پذیر زیر تشکیل شده است:

۱- انبساط برگشت پذیر دما ثابت که در آن گرما به (یا از) چشمه دما بالا منتقل می‌شود.

۲- انبساط برگشت پذیر آدیاباتیکی که در آن دمای سیال کاری از دمای چشمه دما بالا به دمای چشمه دما پایین کاهش می‌یابد.

۳- تراکم برگشت پذیر دما ثابت که در آن گرما به (یا از) چشمه دما پایین منتقل می‌شود.

۴- تراکم برگشت پذیر آدیاباتیکی که در آن دمای سیال کاری از دمای چشمه دما پایین تا دمای چشمه دما بالا افزایش می‌یابد.



شکل ۱-۵ : نمونه ای از یک موتور گرمایی که در چرخه کارنو کار می کند

در شکل ۵-۱ نیروگاهی که در چرخه کارنو کار می‌کند نمایش داده شده است و سیال کاری آن آب می‌باشد. به دلیل برگشت پذیر بودن موتور گرمایی کارنو اگر همه فرآیندها را وارون کنیم، چرخه یخچال را خواهیم داشت، این مطلب در شکل ۵-۱ با خط چین و نوشته‌های درون پرانتز نمایش داده شده است. در این حالت دمای سیال کاری در تبخیرکننده به اندازه بسیار جزئی از دمای چشمه دما بالا بیشتر است. نکته: چرخه کارنو با سیالات مختلفی راه اندازی می‌شود.

مقیاس دمای ترمودینامیکی:

مقیاس دمای ترمودینامیکی کلوین، برای ماشین‌های گرمایی به صورت زیر است:

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L}$$

در معادله اخیر دماها مطلق هستند.

با استفاده از تعریف مقیاس دما، بازده یک ماشین کارنو یا هر ماشین برگشت پذیر دیگر را می توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

بازده به دست آمده، بیشترین بازدهی است که هر ماشین گرمایی (که بین دو منبع گرمایی با دماهای T_H و

T_L کار می کند) می تواند داشته باشد. چنانچه مشاهده می شود، با افزایش T_H یا کاهش T_L ، بازده ماشین

گرمایی کارنو افزایش می یابد. این موضوع در ماشینهای واقعی نیز صدق می کند. بنابراین بازده گرمایی

ماشینهای واقعی را می توان با انتقال گرما در بالاترین دمای ممکن و با دفع گرما در پایین ترین دمای ممکن

به حداکثر رساند.

دو اصل مهم در خصوص چرخه کارنو:

۱- بازده ماشین گرمایی برگشت ناپذیر همیشه کمتر از بازده ماشین برگشت پذیری است که بین همان دو منبع کار می‌کند.

۲- بازده ماشینهای گرمایی برگشت پذیر، به سیال عامل بستگی ندارد و تنها تابع دمای دو منبع می‌باشد.

فصل دوم:

سیستمهای توان و سرمایه‌های

چرخه بسته: چرخه ای است که در آن سیال کاری یک رشته فرآیندها را سپری کرده و در پایان به حالت اولیه باز می‌گردد. مثال: نیروگاه ساده بخار

چرخه باز: سیال کاری در چرخه کامل کار نمی‌کند و ترکیب سیال کاری در ابتدا و انتهای فرآیند متفاوت است. مثال: موتورهای درون سوز و توربین گاز

نکته: چرخه های باز و بسته در خصوص ماشینهای حرارتی و دستگاههای سردساز مطرح می‌شوند.

برای هر دو نوع چرخه بررسی کارکرد چرخه ایده‌ال همانند یک چرخه واقعی کمک بسیار زیادی در طراحی بهینه سیستم‌ها خواهد داشت.

۱-۲- بررسی چرخه های ایده ال برای دستگاه های توان و سردساز:

سیال کاری معمولا بخار و گاز ایده ال در نظر گرفته می شود. از دستگاه هایی مانند بازیابها، کمپرسورهای چند مرحله ای، منبسط کننده ها و سردکن های میانی برای بهبود عملکرد سیستم ها استفاده می شود.

۲-۲- سیستم های توان

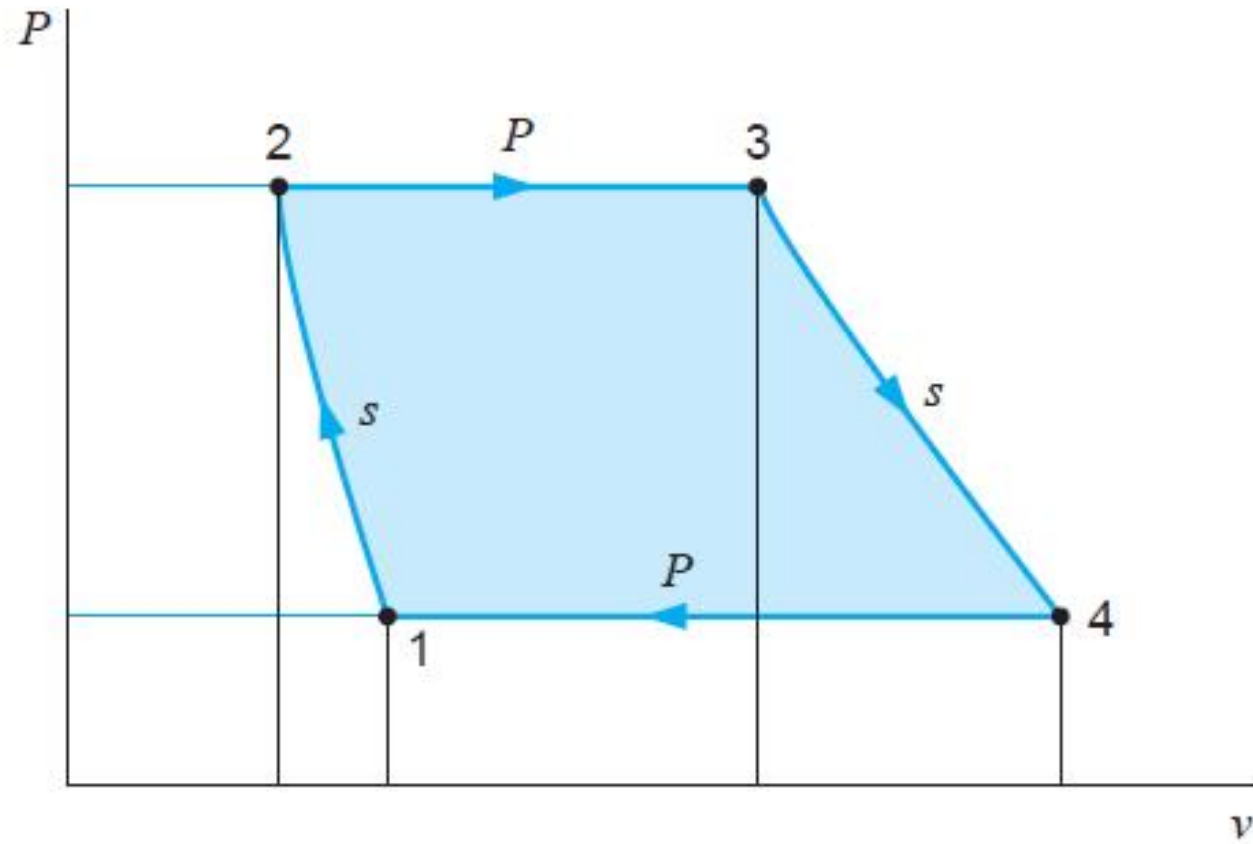
موتورهای گرمایی را می توانیم به صورت دستگاه های حالت پایا-جریان پایا برای کار محوری و یا به شکل سیلندر-پیستونی با کار در مرز جابه جا شونده داشته باشیم. سیال کاری در طول چرخه می تواند تک فاز باشد یا تغییر فاز بدهد.

یک سیستم توان مانند شکل ۵-۱ را با چهار فرآیند SSSF در نظر می‌گیریم و فرض می‌کنیم که فرایندهای آن برگشت پذیر درونی بوده و از تغییرات انرژی‌های جنبشی و پتانسیل نیز صرف نظر می‌شود. کار هریک از فرایندها از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$w = -\int_i^e v dp \quad (2-1)$$

برای سادگی در کار فرایندهای انتقال گرمای دیگ بخار و چگالنده فشار ثابت و فرایندهای پمپ و توربین هر دو ادیاباتیکی و انتروپی ثابت فرض می‌شوند، در این صورت چرخه توان به صورت شکل ۱-۲ خواهد بود.

کار خالص خروجی از رابطه (۲-۲) محاسبه می‌گردد:



سلسل ۱-۱: چهار تراپید چرخه توان

$$W_{net} = -\int_1^2 v dP + \int_3^4 v dP$$

(۲-۲)

اگر چهار فرآیند چرخه نشان داده شده در شکل ۱-۲ در سیلندر و پیستونی همراه با کار در

مرز جابه‌جا شونده انجام شوند، آنگاه کار خالص در خروجی این سیستم توان از رابطه ۳-۲

به دست می‌آید :

$$W_{net} = \int_1^2 Pdv + \int_2^3 Pdv + \int_3^4 Pdv + \int_4^1 Pdv \quad (۲-۳)$$

همانطور که در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود، وجود یک سطح مثبت خالص نشان دهنده کار

خالص خروجی است.

۳-۲- چرخه رانکین:

چرخه رانکین چرخه ایده‌ال چرخه توان است که در آن بیشینه سازی اختلاف حجم مخصوص در راستای فرآیندهای انبساط و تراکم انجام شده است و الگوی ایده‌ال نیروگاه بخار می‌باشد. در چرخه رانکین شکل ۱-۲ حالت ۱ مایع اشباع و حالت ۳ بخار اشباع یا فوق داغ است.

چرخه رانکین شامل چهار فرآیند زیر است:

۱-۲: فرآیند پمپ کردن آدیاباتیک برگشت پذیر در پمپ

۲-۳: انتقال گرمای فشار ثابت در دیگ بخار

۳-۴: انبساط آدیاباتیک برگشت پذیر در توربین

۴-۱: انتقال گرمای فشار ثابت در چگالنده

بازده چرخه رانکین از رابطه زیر به دست می‌آید:

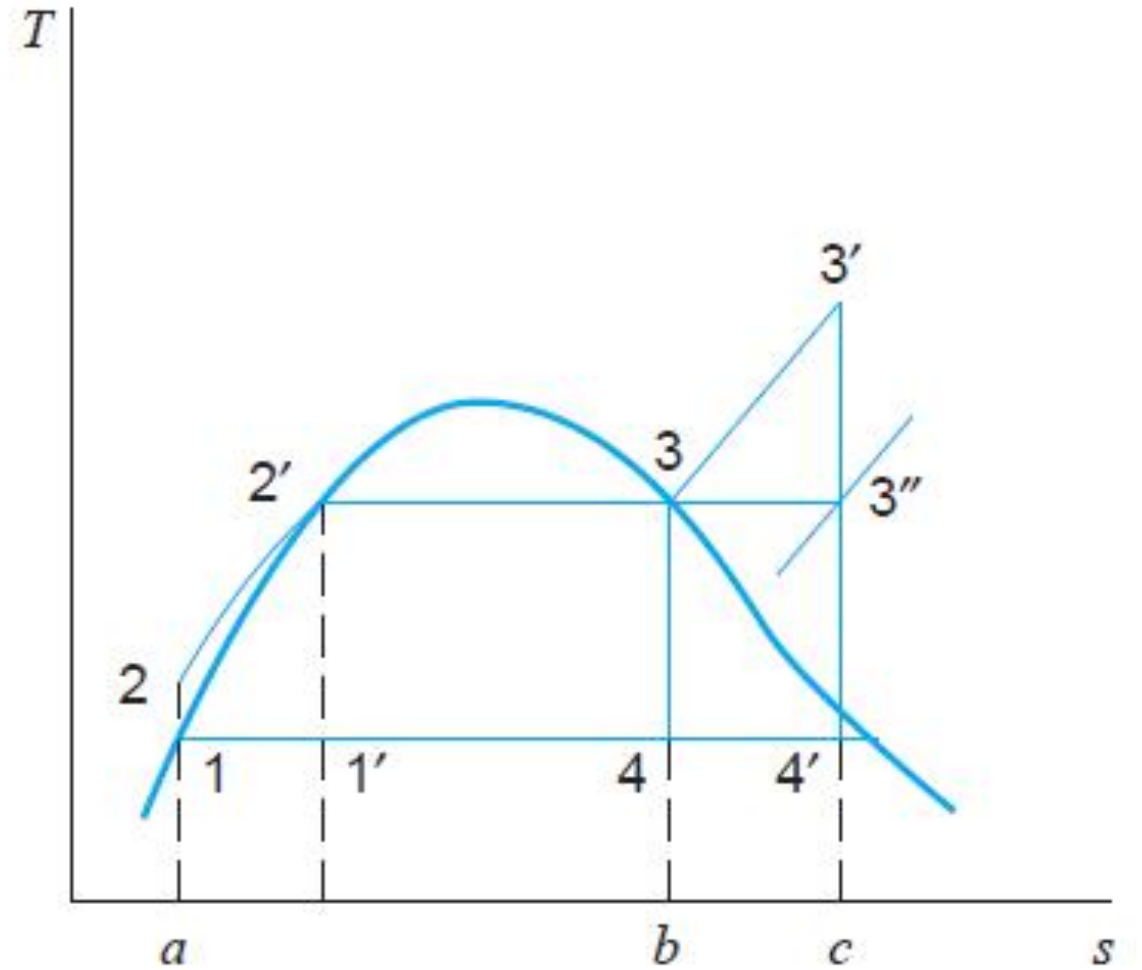
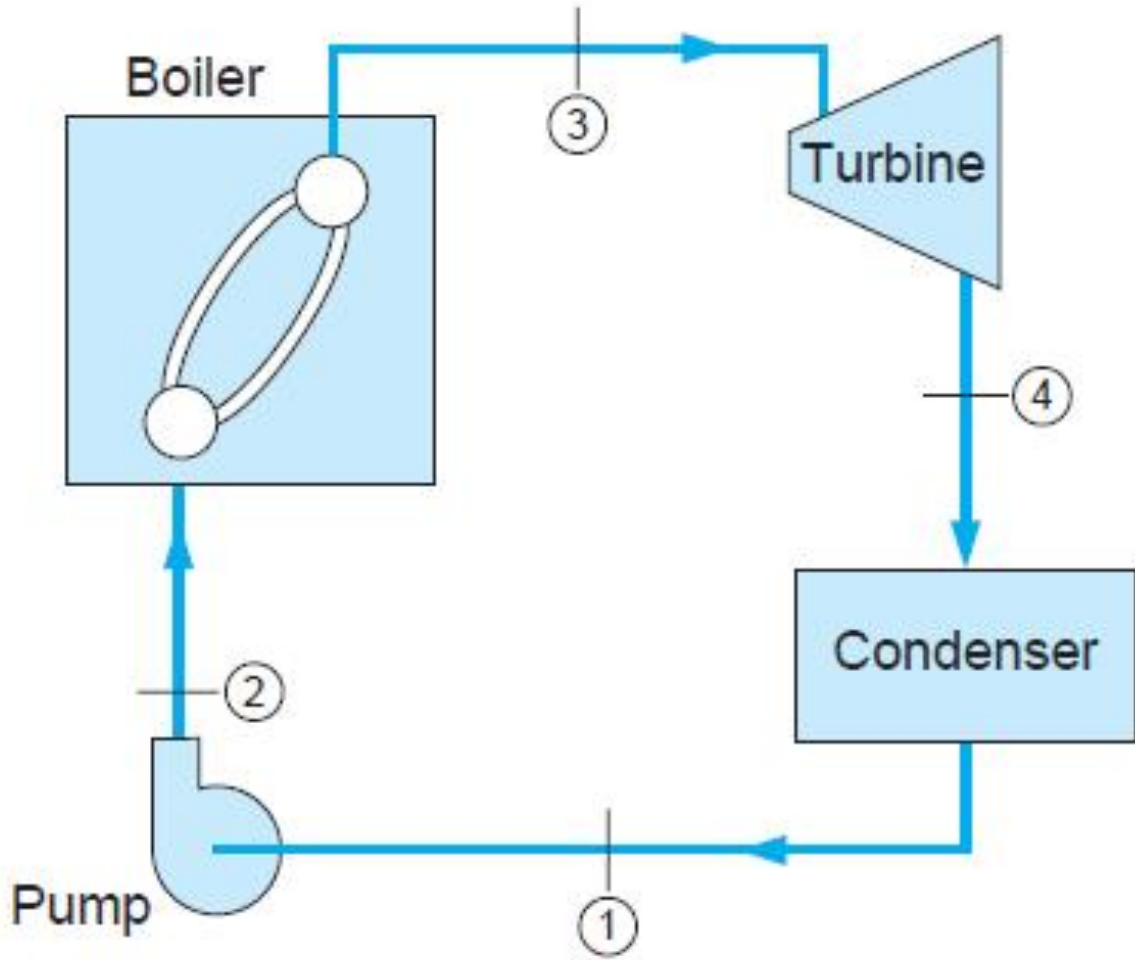
$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_H} = \frac{\text{area } 1-2-2'-3-4-1}{\text{area } a-2-2'-3-b-a}$$

در چرخه رانکین بهتر است که بازده بر پایه میانگین دمای تغذیه و دفع گرما بررسی شود.

هرگونه تغییری که موجب افزایش میانگین دمای تغذیه گرما یا کاهش میانگین دما در دفع

گرما گردد، افزایش بازده چرخه رانکین را پدید می‌آورد.

در شکل ۲-۲ یک نیروگاه بخار که در چرخه رانکین کار می‌کند نشان داده شده است:



شکل ۲-۲: یک نیروگاه ساده بخار که در چرخه رانکین کار می کند

۴-۲- اثر فشار و دما بر چرخه رانکین:

فشار خروجی: همانطور که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است، اگر فشار خروجی از P_4 تا P'_4

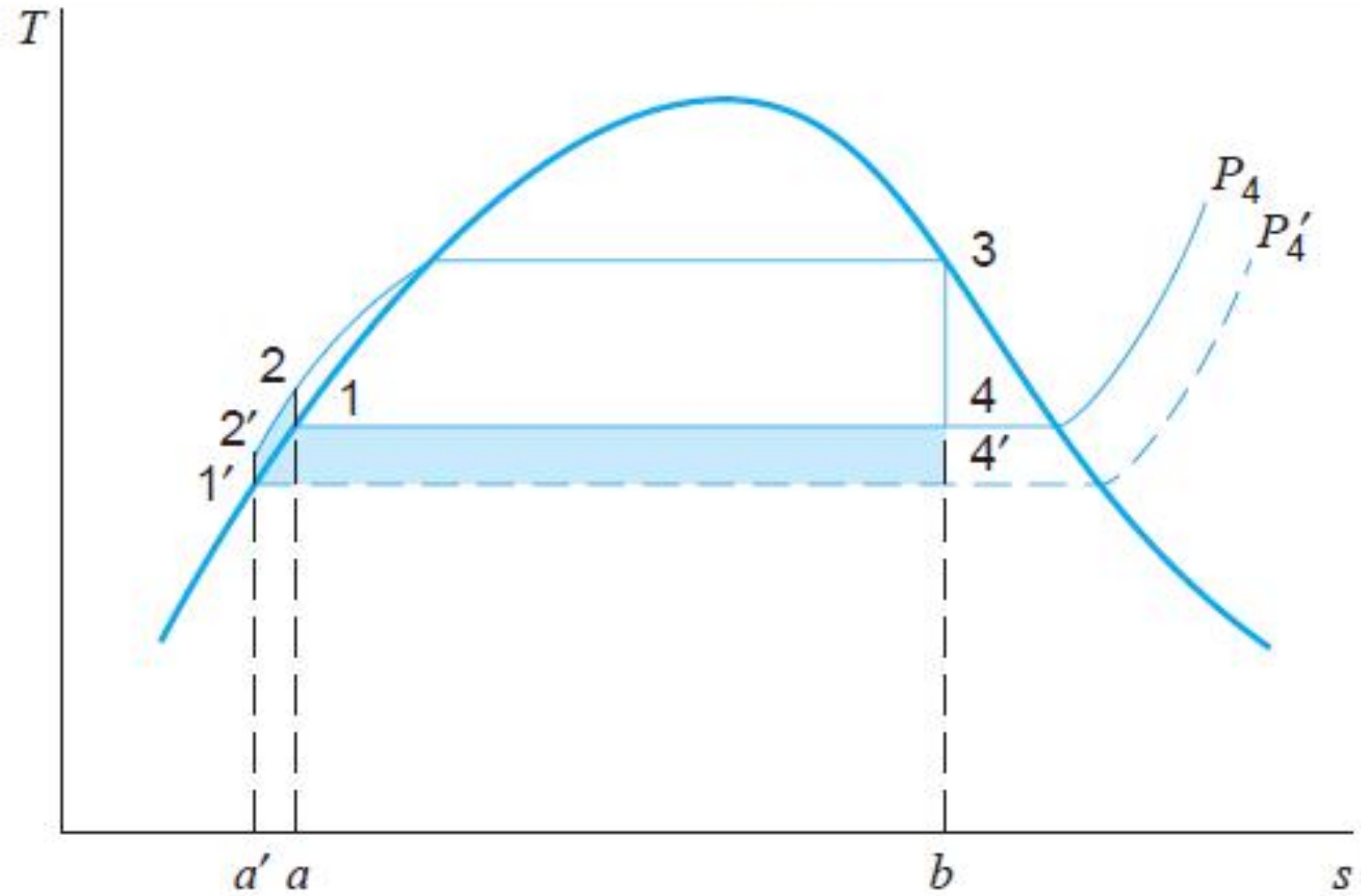
افت کند، همزمان با این افت فشار دفع گرما نیز کاهش می‌یابد و کار خالص نیز به اندازه

مساحت $1-2-2'-1'-4-4'-1$ افزایش می‌یابد. انتقال گرما به بخار هم به اندازه

مساحت $a'-2-2-a$ افزایش می‌یابد. چون این دو سطح تقریباً برابر هستند، در

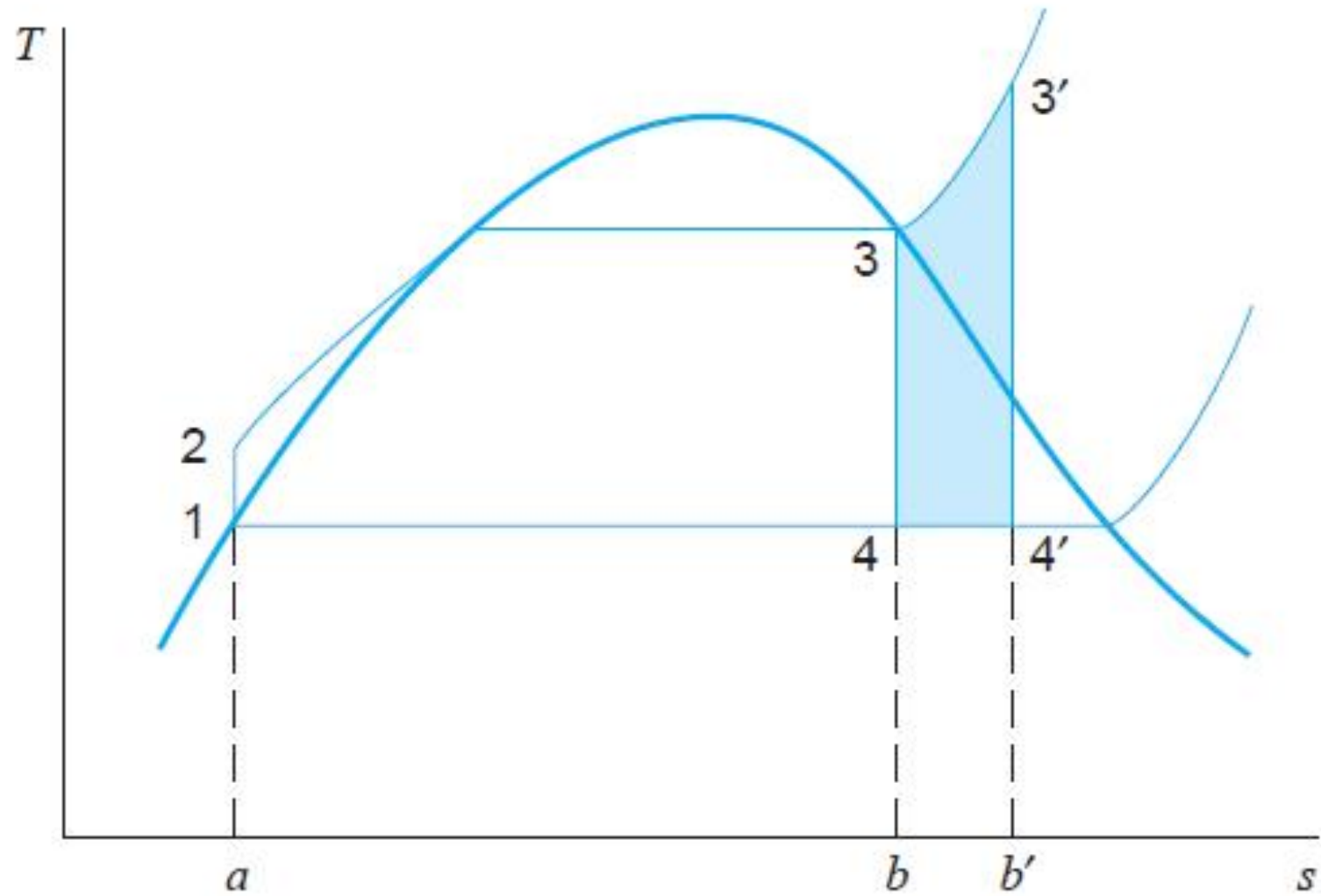
نتیجه بازده چرخه افزایش می‌یابد. همچنین آشکار است که میانگین دمای دفع گرمای

چرخه هم کاهش یافته است.



شکل ۳-۲: اثر فشار خروجی بر بازده چرخه رانکین

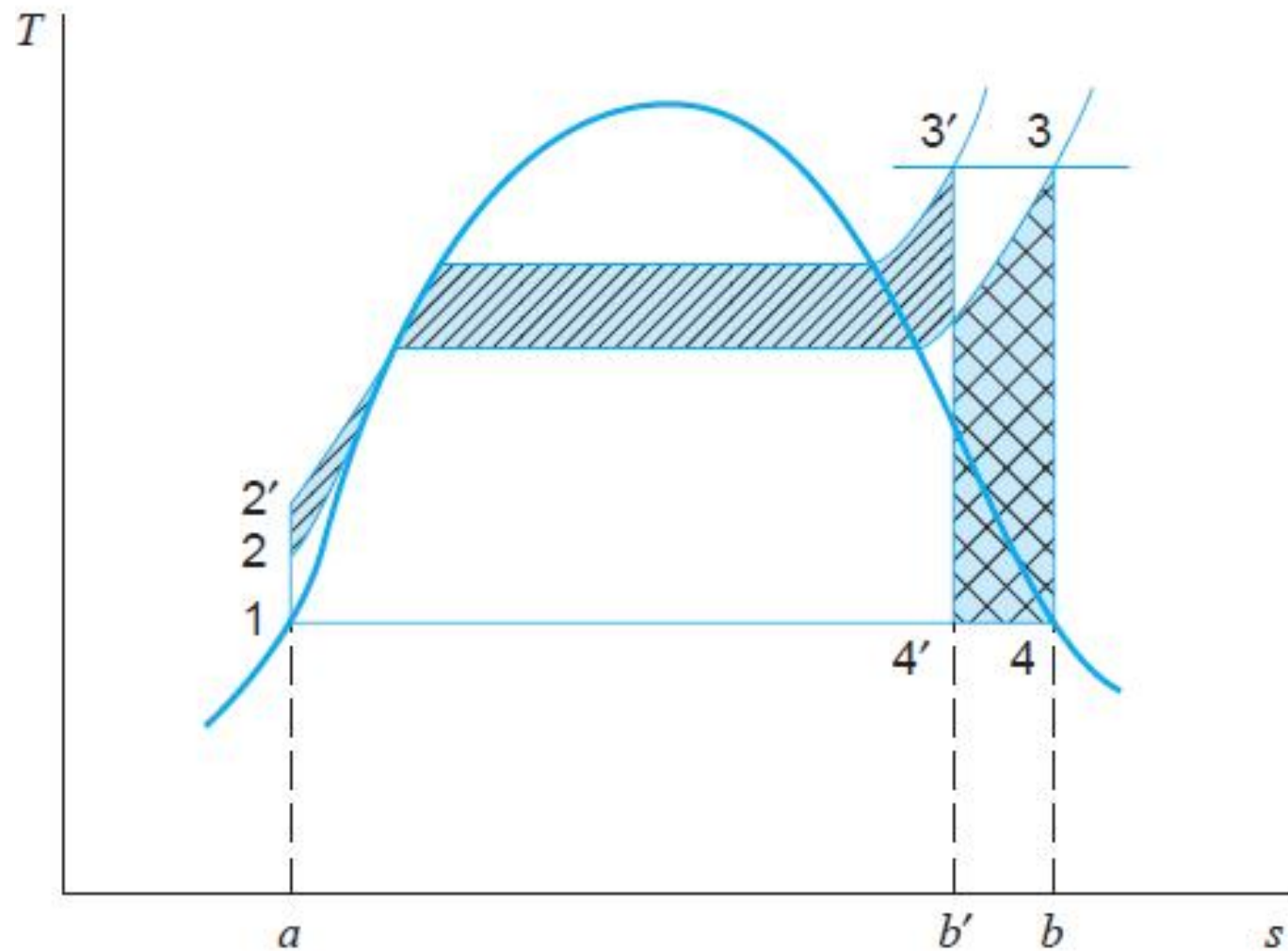
فوق داغ شدن بخار: همانطور که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است، با فوق داغ شدن بخار در دیگ بخار، کار به اندازه مساحت $3-3'-4'-4-3$ و انتقال گرمای دیگ بخار به اندازه مساحت $3-3'-b'-b-3$ افزایش می‌یابد. چون نسبت این دو مساحت بزرگتر از نسبت کار خالص به گرمای داده شده در بقیه چرخه می‌باشد، آشکار است که فوق داغ کردن بخار در فشار معین، افزایش بازده چرخه رانکین را پدید می‌آورد.



شکل ۲-۴: اثر فوق داغ کردن بر بازده چرخه رانکین

بیشینه فشار بخار: در این بررسی بیشینه دمای بخار آب همانند فشار خروجی ثابت نگه داشته می‌شود. گرمای دفع شده به اندازه مساحت $b' - 4' - 4 - b - b'$ کاهش می‌یابد. کار خالص به اندازه مساحت بخش هاشور زده افزایش یافته و به اندازه مساحت بخشی که دوبار هاشور خورده، کاهش می‌یابد. بنابراین کار خالص میل به ثابت ماندن دارد، اما گرمای دفع شده کاهش می‌یابد و از این رو با افزایش فشار بیشینه، بازده چرخه رانکین افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فشار، میانگین دمای تغذیه گرما نیز افزایش می‌یابد. (شکل ۵-۲)

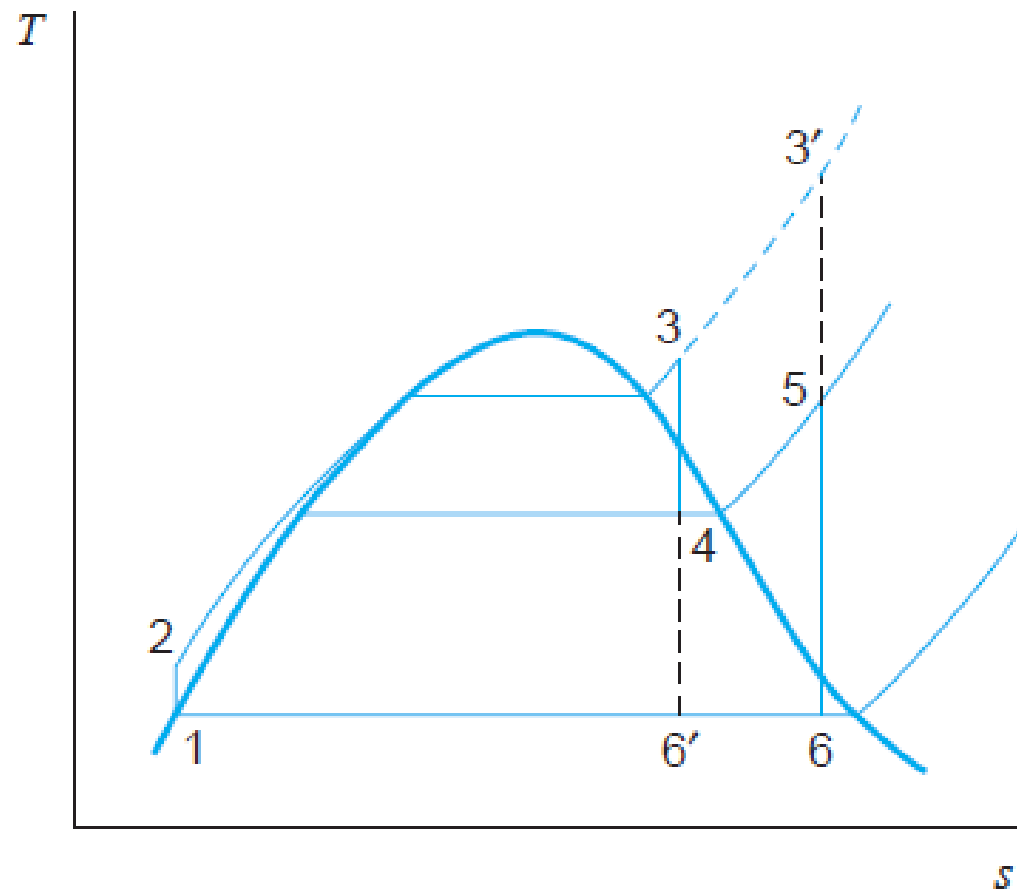
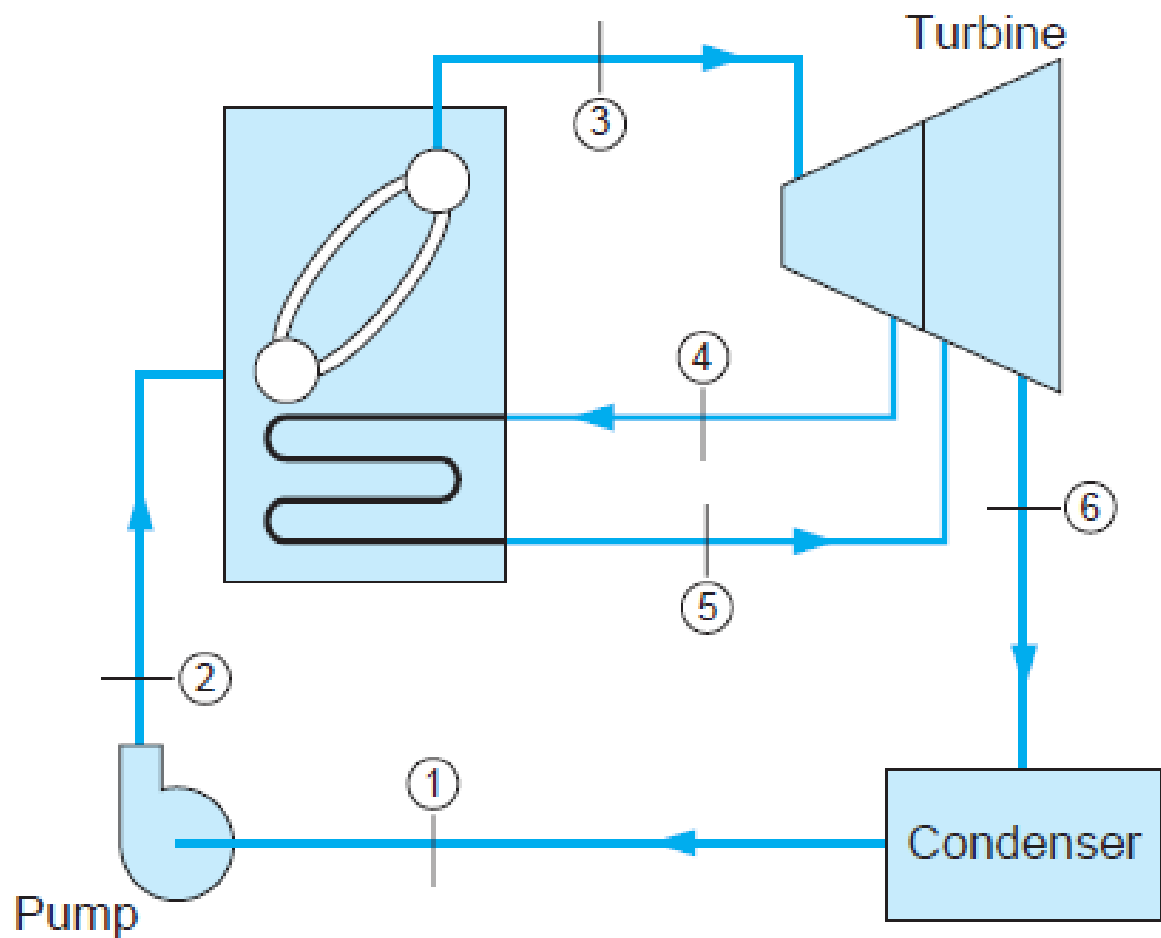
بنابراین بازده چرخه رانکین با **کاهش فشار خروجی**، با **افزایش فشار در راستای افزودن گرما** و با **فوق داغ کردن بخار آب** افزایش می‌یابد.



شکل ۵-۲: اثر فشار دیگ بخار بر بازده چرخه رانکین

۵-۲- چرخه گرمایش مجدد:

این چرخه از طریق افزایش فشار ماکزیمم سیکل، بازده را افزایش می‌دهد و در عین حال از تشکیل رطوبت در توربین جلوگیری می‌کند. شکل چرخه و نمودار $T - S$ آن در شکل ۶-۲ نمایش داده شده است. ویژگی این چرخه این است که بخار درون توربین در فشاری میانی منبسط شده و سپس در دیگ بخار دوباره گرم می‌شود و سپس در توربین تا فشار خروجی منبسط می‌شود. با توجه به نمودار $T - S$ مشخص است که چون دمای میانگینی که در آن گرما افزوده می‌شود تغییر زیادی ندارد، بنابراین گرمایش دوباره تاثیر بسیار کمی در افزایش بازده دارد و مزیت اصلی این چرخه کاهش رطوبت طبقات فشار پایین توربین است.



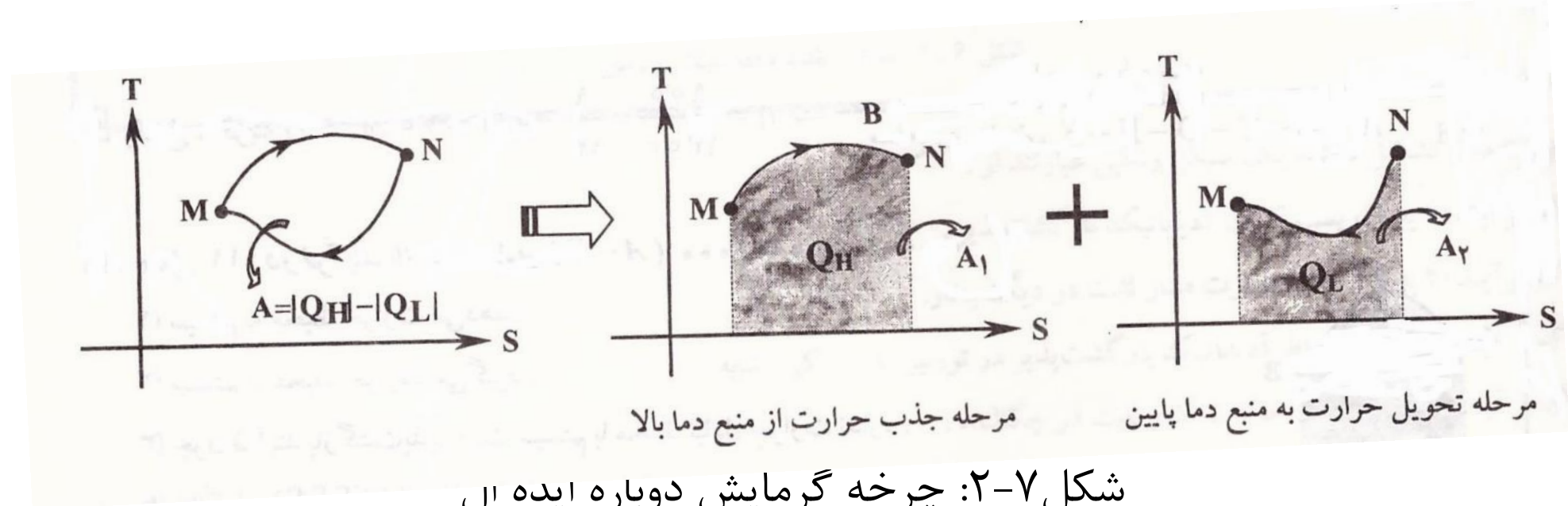
شکل ۶-۲: چرخه گرمایش دوباره ایده ال

۶-۲- کاربرد دیاگرام T-S در تعیین مشخصات سیکل تولید قدرت:

در فرآیندهای برگشت پذیر، سطح زیر منحنی دیاگرام $T-S$ ، معرف میزان انتقال حرارت طی فرآیند می باشد، همچنین اگر فرآیند تولید قدرت برگشت پذیر باشد داریم:

۱- کاهش آنروپی با گرفتن حرارت از سیستم همراه است (Q_L)

۲- کاهش آنروپی با گرفتن حرارت از سیستم همراه است (Q_H)



شکل ۷-۲: چرخه گرمایش دوباره ایده ال

۷-۲- سیکل‌های استاندارد هوایی:

در بسیاری از دستگاه‌های مولد کار (مانند موتورهای سیال کاری همواره گاز است. موتور دیزل و توربین گازی نمونه‌هایی از این دستگاه‌ها هستند. در همه این موتورهای ترکیب سیال کاری تغییر می‌کند زیرا در فرآیند احتراق، هوا و سوخت به محصولات احتراق تبدیل می‌شوند. به این دلیل این موتورها را موتورهای درون سوز نامیده‌اند و برعکس نیروگاه بخار را موتور برون سوز می‌نامند زیرا گرما از محصولات احتراق به سیال کاری منتقل می‌شود. در موتورهای درون سوز سیال کاری سیکل یک گاز است و فازهای مایع یا حالت‌های دوفازی در سیکل دیده نمی‌شود. سیکل استاندارد هوایی با وجود بسته بودن، تقریباً مناسبی برای چرخه‌های باز است، البته به شرط اینکه شرایط زیر وجود داشته باشد:

۱- سیال کاری جرم ثابتی از هوا با فرض گاز کامل باشد و با این فرض فرآیندهای مکش و تخلیه حذف می‌شوند.

۲- یک فرآیند انتقال حرارت از منبع دما بالای خارجی، جایگزین فرآیند احتراق می‌شود.

۳- یک فرآیند انتقال حرارت به محیط (منبع دما پایین) جایگزین مرحله تخلیه می شود.

۴- ظرفیت گرمایی ویژه هوا ثابت در نظر گرفته می شود.

۵- فرآیندها برگشت پذیر در نظر گرفته می شوند.

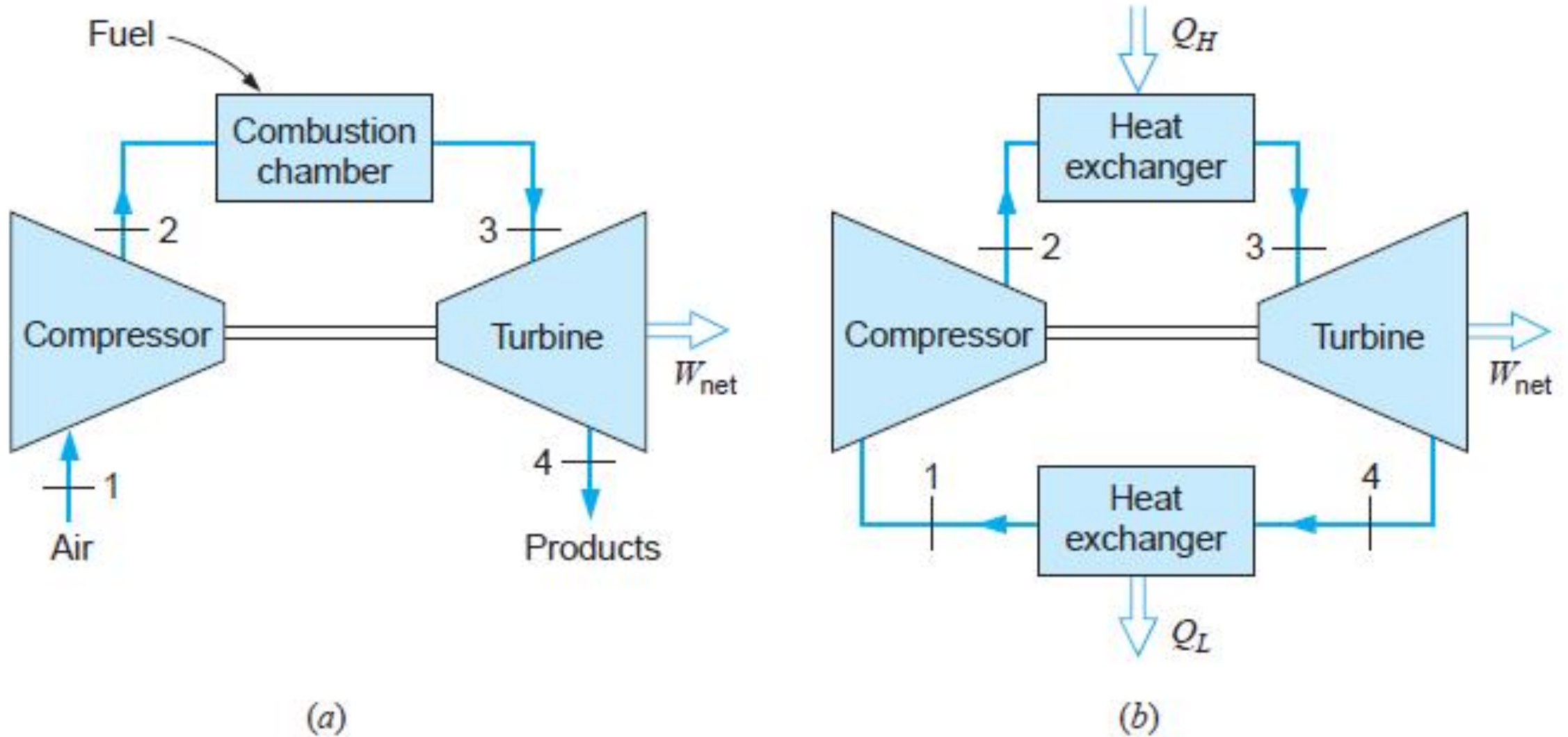
۸-۲- چرخه برایتون

در قسمتهای قبل چرخه رانکین با دو فرآیند فشار ثابت و دو فرآیند آنتروپی ثابت که در آن سیال کاری یک سیال چگالیده بود، بررسی شد. اگر این چرخه با سیال کاری تک فاز گازی به کار رود، چرخه برایتون نامیده می شود. چرخه استاندارد هوای

برایتون چرخه ایده‌ال برای توربین گاز ساده است. در شکل ۸-۲ یک توربین گاز ساده در چرخه باز که در آن فرآیند

درون سوزی رخ می دهد و همچنین یک توربین گاز ساده در چرخه بسته که فرآیندهای انتقال گرما دارد، نشان داده شده

است.

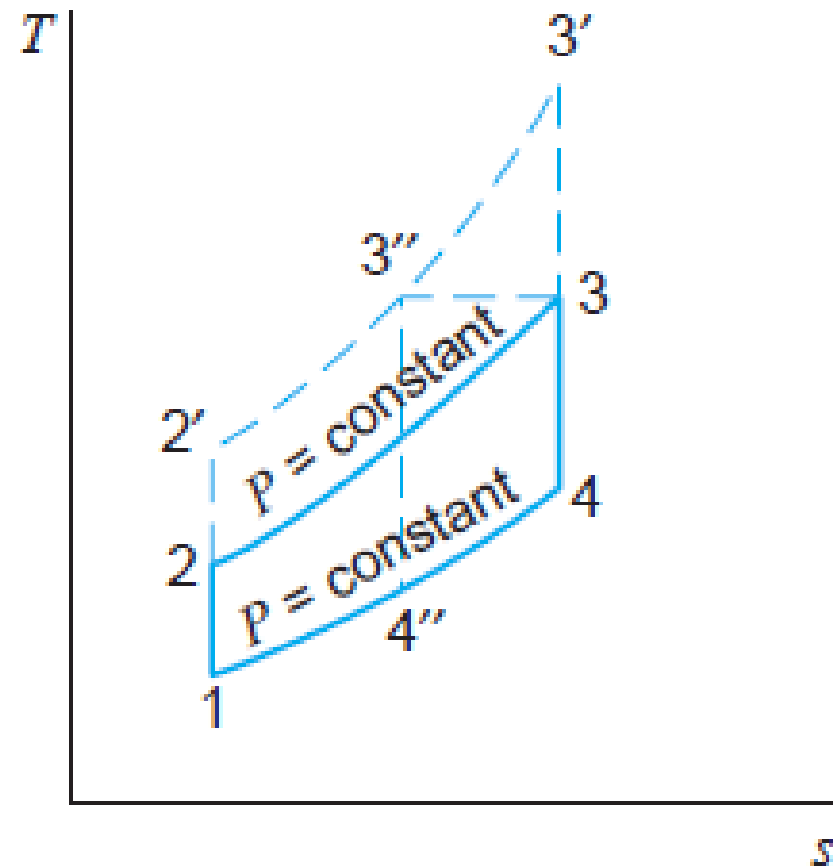
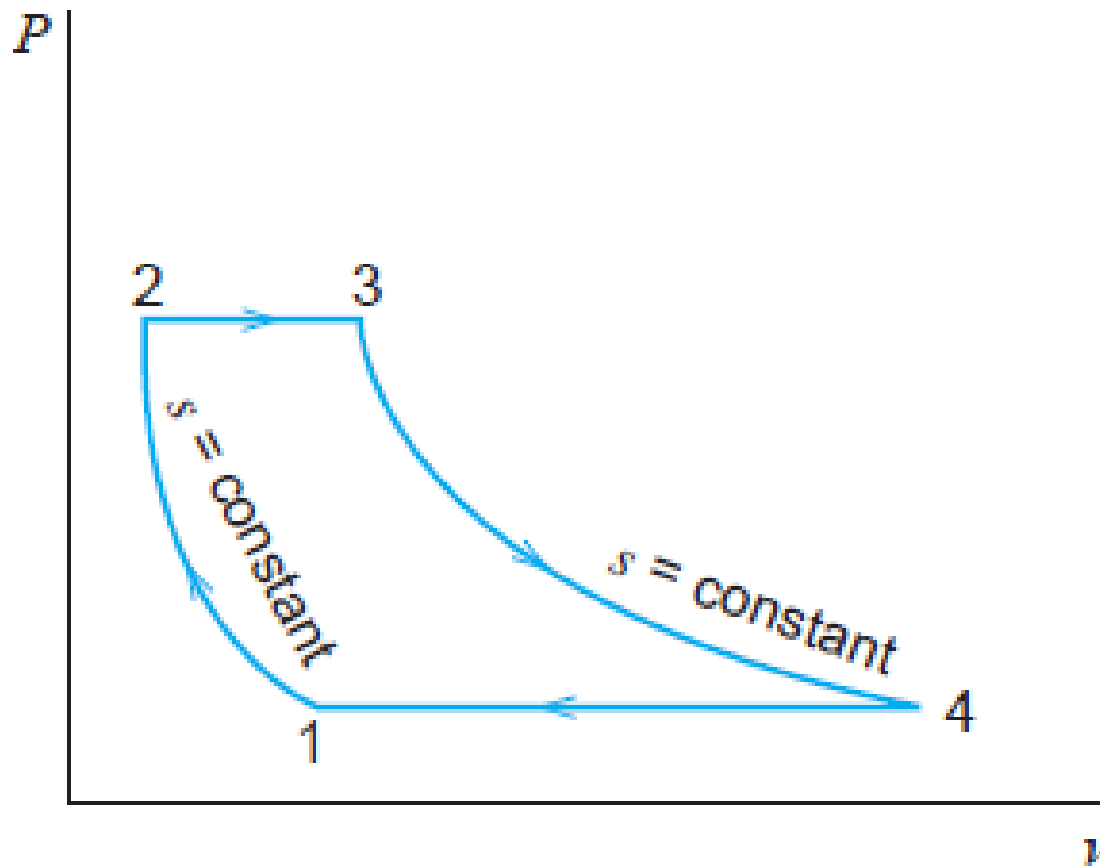


(a)

(b)

شکل ۸-۲: توربین گاز در چرخه برایتون (a) چرخه باز (b) چرخه بسته

چرخه استاندارد هوای برایتون در نمودارهای P-v و T-s شکل ۹-۲ نشان داده شده است:



شکل ۹-۲: چرخه هوای استاندارد برای تون

بازده چرخه هوای استاندارد برای تون از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{C_P(T_4 - T_1)}{C_P(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

از قبل می دانیم:

$$\frac{P_3}{P_4} = \frac{P_2}{P_1}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{k/(k-1)} = \frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{T_3}{T_4} \right)^{k/(k-1)}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} \Rightarrow \frac{T_3}{T_2} - 1 = \frac{T_4}{T_1} - 1$$

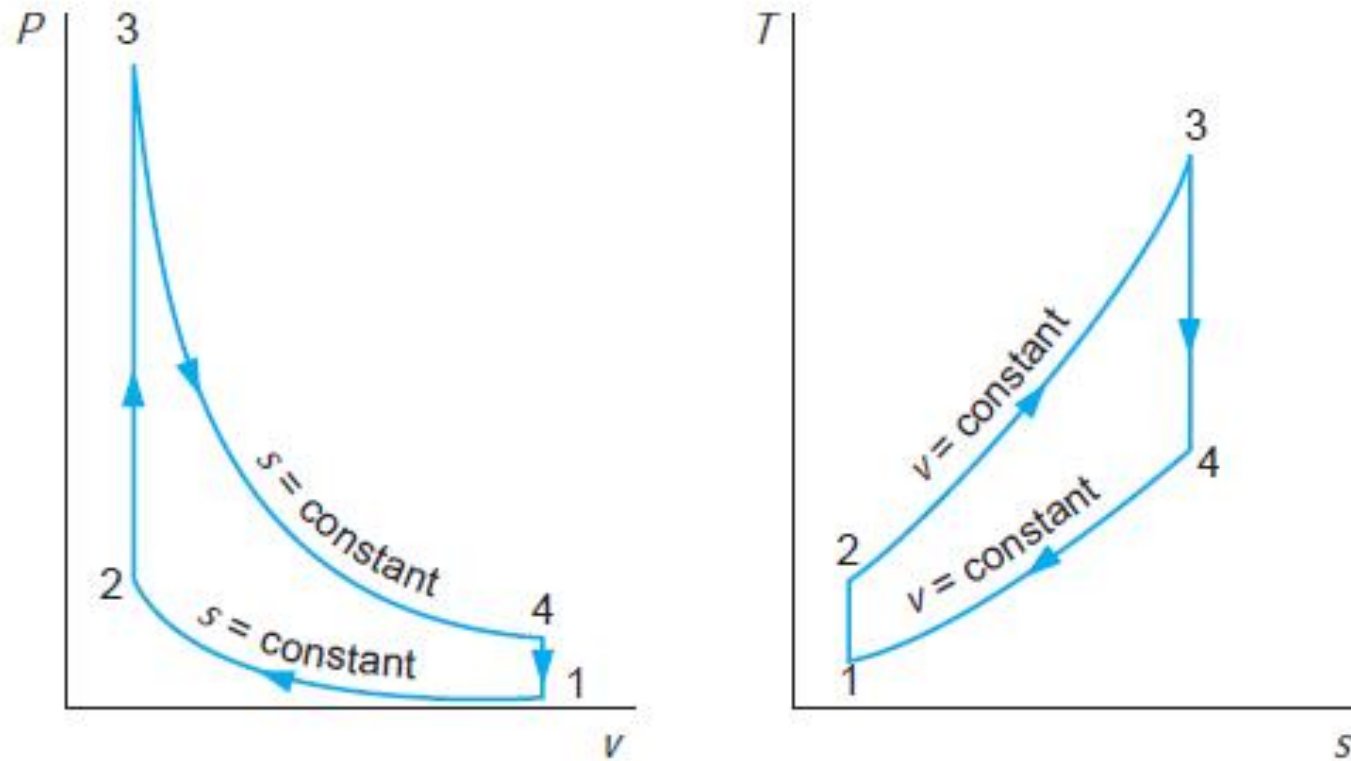
$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{(P_2/P_1)^{(k-1)/k}}$$

نکته: در سیکل برایتون نسبت $\frac{P_2}{P_1}$ ، نسبت فشار ایزنتروپیک نام دارد.

۲-۹- چرخه استاندارد هوایی اتو

این سیکل، سیکل ایده ال موتور درونسوز اشتعال جرقه ای است و نمودارهای $P-v$ و $T-s$ آن در شکل زیر نمایش داده شده

است:



شکل ۲-۱۰: چرخه استاندارد هوایی اتو

سیکل اتو از مراحل اصلی زیر تشکیل شده است:

۱- تراکم ایزنتروپیک، شروع از نقطه مرگ پایین (BDC) و پایان در مرگ بالای سیلندر (TDS)

۲- انتقال حرارت Q_H به سیستم در حجم ثابت، این مرحله جایگزین احتراق در موتورهای بنزینی شده است.

۳- انبساط ایزنتروپیک، شروع از مرگ بالا (TDC) و پایان در مرگ پایین سیلندر (BDC)

۴- انتقال حرارت Q_L به محیط در حجم ثابت، این مرحله جایگزین تخلیه محصولات احتراق در موتورهای احتراق داخلی شده است.

مصرف و تولید قدرت به ترتیب در مراحل تراکم و انبساط ایزنتروپیک صورت می‌گیرند. با فرض ثابت بودن گرمای ویژه هوا، بازده گرمایی این چرخه از روابط زیر محاسبه می‌گردد:

$$\eta_{th} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{mC_v(T_4 - T_1)}{mC_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

همچنین از قبل به یاد داریم:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{k-1} = \frac{T_3}{T_4}$$

بنابراین:

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1}$$

و نهایتاً بازده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - (r_v)^{1-k} = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}}$$

در رابطه بازده r_v نسبت تراکم است و مقدار آن از روابط زیر به دست می‌آید:

$$r_v = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$$

نکته: بازده سیکل اتو فقط تابع نسبت تراکم است و با افزایش نسبت تراکم افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۱-۲ منحنی بازده گرمایی چرخه استاندارد اتو در برابر نسبت تراکم نمایش داده شده است و همانطور که در نمودار

مشاهده می‌گردد با بالا بردن نسبت تراکم بازده هم بالا می‌رود.

عوامل اختلاف بین چرخه باز موتورهای اشتعال - جرقه ای واقعی و چرخه استاندارد هوا:

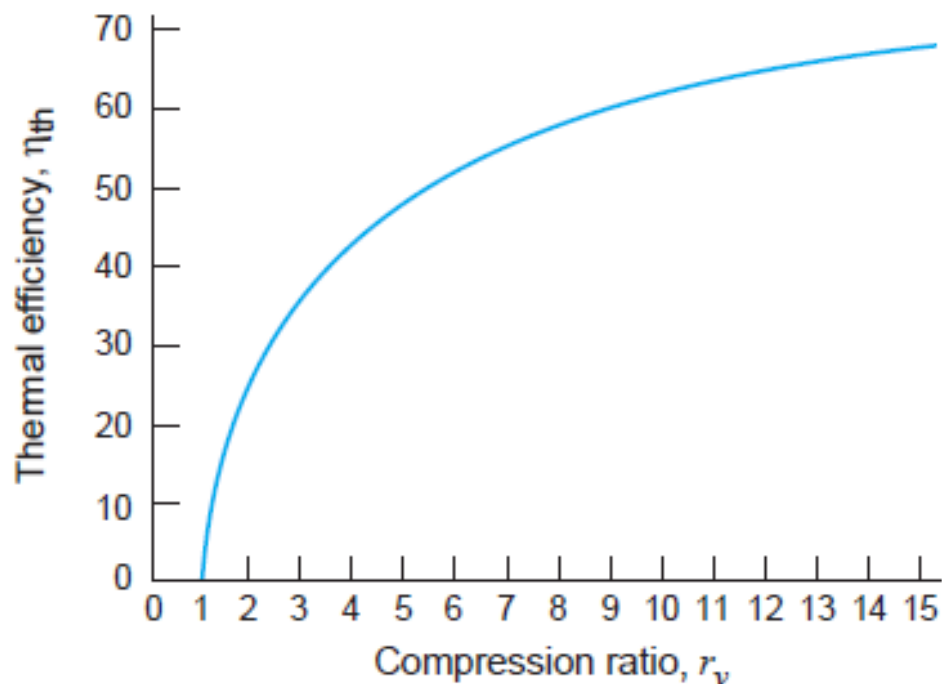
۱- با افزایش دما، گرمای ویژه گازهای واقعی افزایش می‌یابد.

۲- در دمای بالا، فرایند احتراق جانشین فرآیند انتقال گرما می‌شود و شاید احتراق ناقص باشد.

۳- هر چرخه مکانیکی از موتور با فرآیندهای مکش و تخلیه همراه است و چون در سوپاپ‌ها افت فشار روی می‌دهد، مقداری کار برای مکش هوا و تخلیه محصولات احتراق نیاز است.

۴- انتقال گرمای زیادی بین گازها و دیواره سیلندر انجام می‌شود.

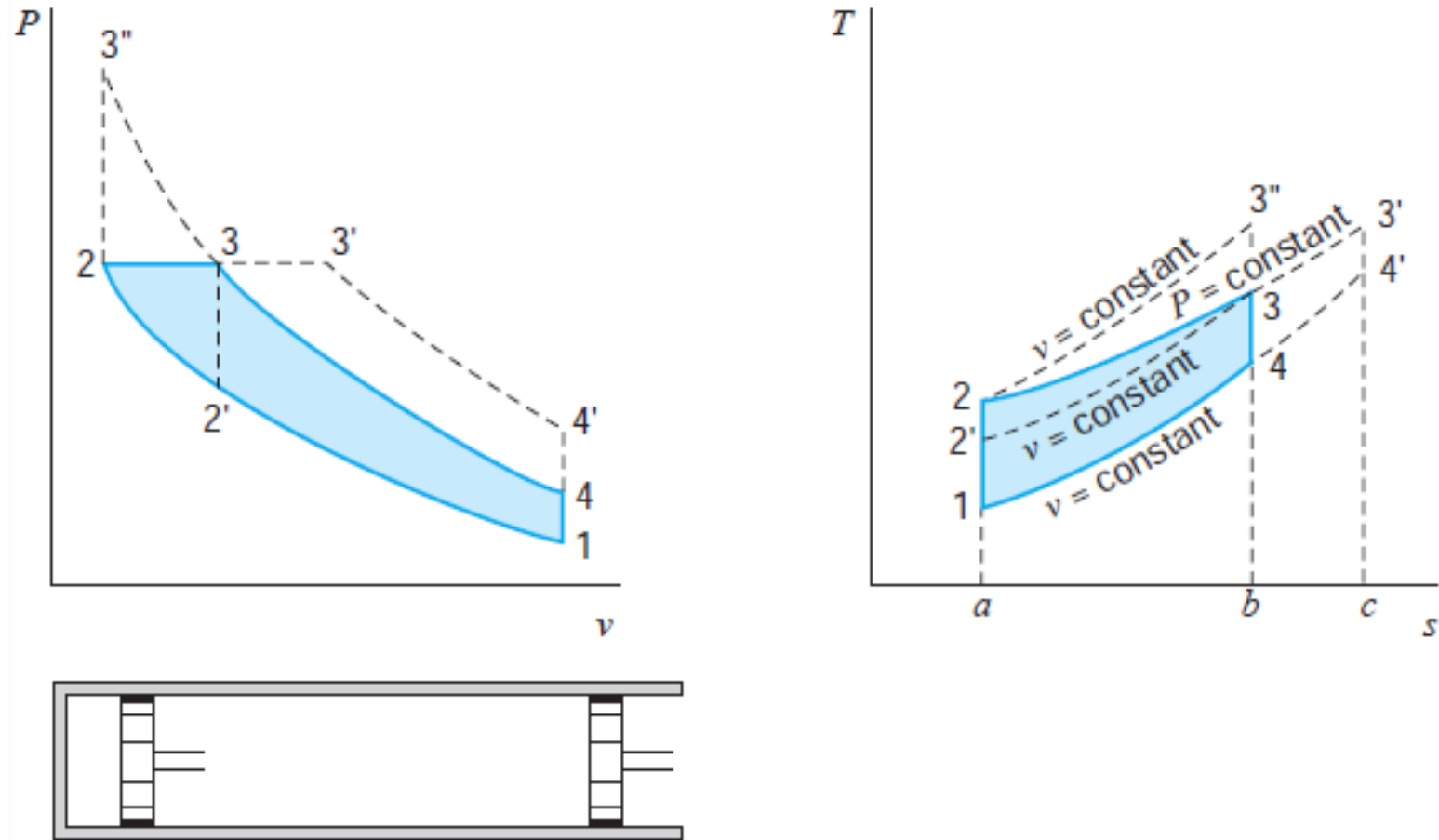
۵- همراه با تغییر فشار و دما، برگشت ناپذیریهای پدید خواهد آمد.



شکل ۱۱-۲- بازده گرمایی چرخه اتو به شکل تابعی از نسبت تراکم

۱۰-۲- چرخه استاندارد هوایی دیزل

این چرخه، چرخه ایده‌ال برای موتور دیزل است که موتور تراکم-اشتعال نیز نامیده می‌شود و دیاگرامهای $P-v$ و $T-s$ آن در شکل ۱۲-۲ نشان داده شده است:



شکل ۱۲-۲: چرخه استاندارد هوای دیزل

با توجه به شکل ۱۲-۲ چرخه استاندارد هوای دیزل دارای چهار مرحله زیر است:

۱- تراکم ایزنتروپیک، شروع از مرگ پایین و پایان در مرگ بالا

۲- انتقال حرارت Q_H به سیستم در فشار ثابت، این مرحله جایگزین احتراق در موتورهای دیزلی شده است.

۳- انبساط ایزنتروپیک، شروع از قبل از مرگ بالا و پایان در مرگ پایین

۴- انتقال حرارت Q_L به محیط در حجم ثابت، این مرحله جایگزین تخلیه محصولات احتراق در موتورهای دیزلی شده است.

بازده چرخه دیزل از رابطه زیر یافته می‌شود:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{mC_v(T_4 - T_1)}{mC_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{kT_2(T_3/T_2 - 1)}$$

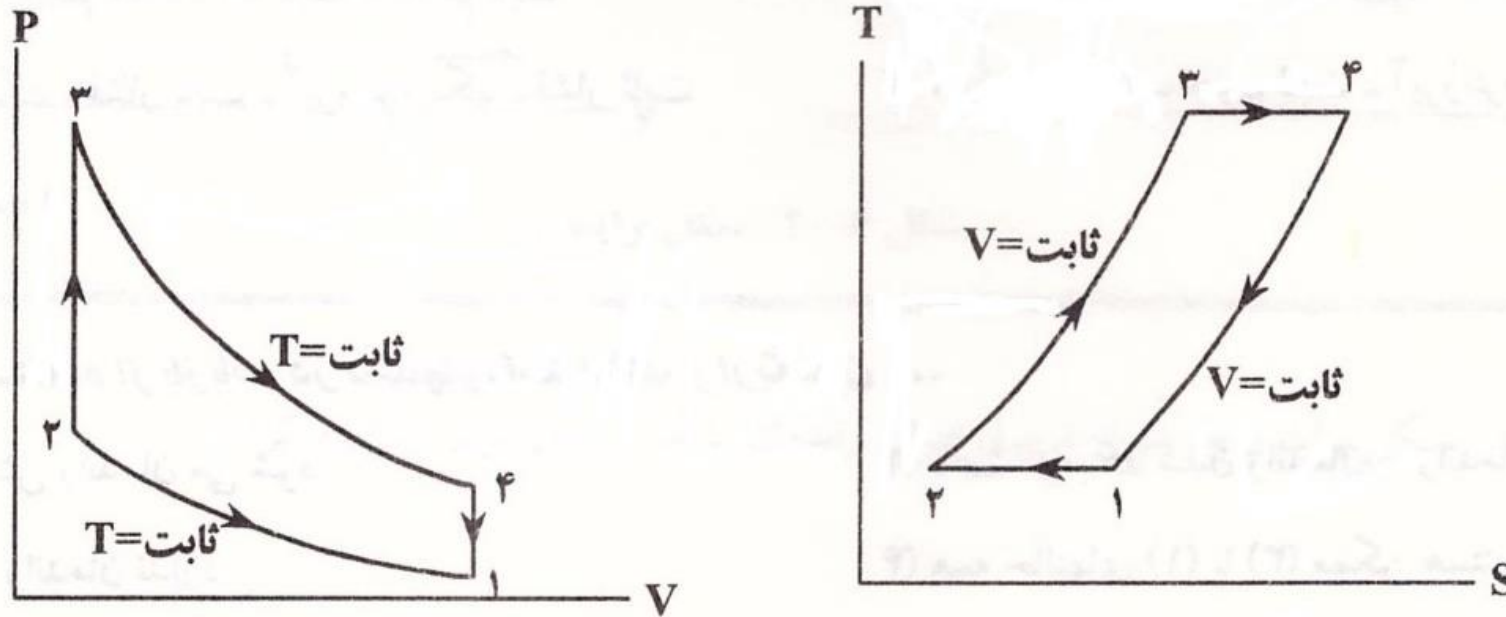
مقایسه سیکل‌های اتو و دیزل:

- ۱- در سیکل اتو انتقال حرارت Q_H به سیستم در حجم ثابت است اما در سیکل دیزل این فرآیند در فشار ثابت انجام می‌شود.
 - ۲- خطوط حجم ثابت و فشار ثابت همگرا هستند زیرا شیب خط حجم ثابت بیش از شیب خط فشار ثابت در دیاگرام T-S می‌باشد.
 - ۳- فرآیند ۲ به ۳ یعنی انتقال حرارت به سیستم در فشار ثابت، در دیاگرام T-S شیب کمتری نسبت به فرآیند مشابه در سیکل اتو دارد. زیرا در سیکل اتو این فرآیند حجم ثابت است.
 - ۴- در سیکل اتو نسبت تراکم و انبساط ایزنتروپیک هر دو برابرند، اما در سیکل دیزل، نسبت تراکم ایزنتروپیک بیشتر از نسبت انبساط ایزنتروپیک است.
- نکته: اگر در مرحله دادن حرارت Q_H به سیستم، از طریق انتقال حرارت بیشتر، دمای ماکزیمم سیکل را افزایش دهیم (از ۳ به ۳') راندمان سیکل کاهش می‌یابد، زیرا با توجه به همگرا بودن خطوط حجم ثابت و فشار ثابت، برای به دست آوردن کار خالص ناچیز باید Q_H زیادی را هزینه کنیم.

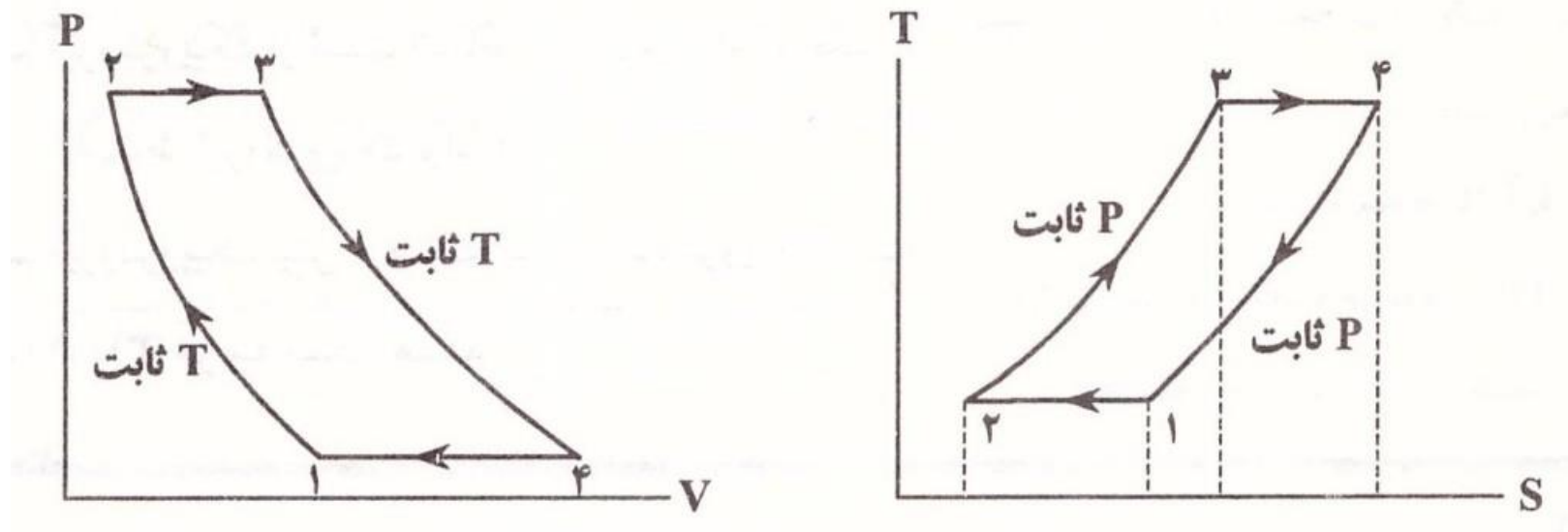
۱۱-۲- سیکل های اریکسون و استرلینگ

نمودارهای $P-V$ و $T-S$ این دو سیکل در شکل های ۲-۱۳ و ۲-۱۴ نمایش داده شده اند. همان طور که ملاحظه می شود تفاوت سیکل استرلینگ و اریکسون در این است که فرآیندهای حجم ثابت سیکل استرلینگ در سیکل اریکسون جای خود را به فرآیندهای فشار ثابت می دهند. در هر دو سیکل تراکم و انبساط همدما می باشد.

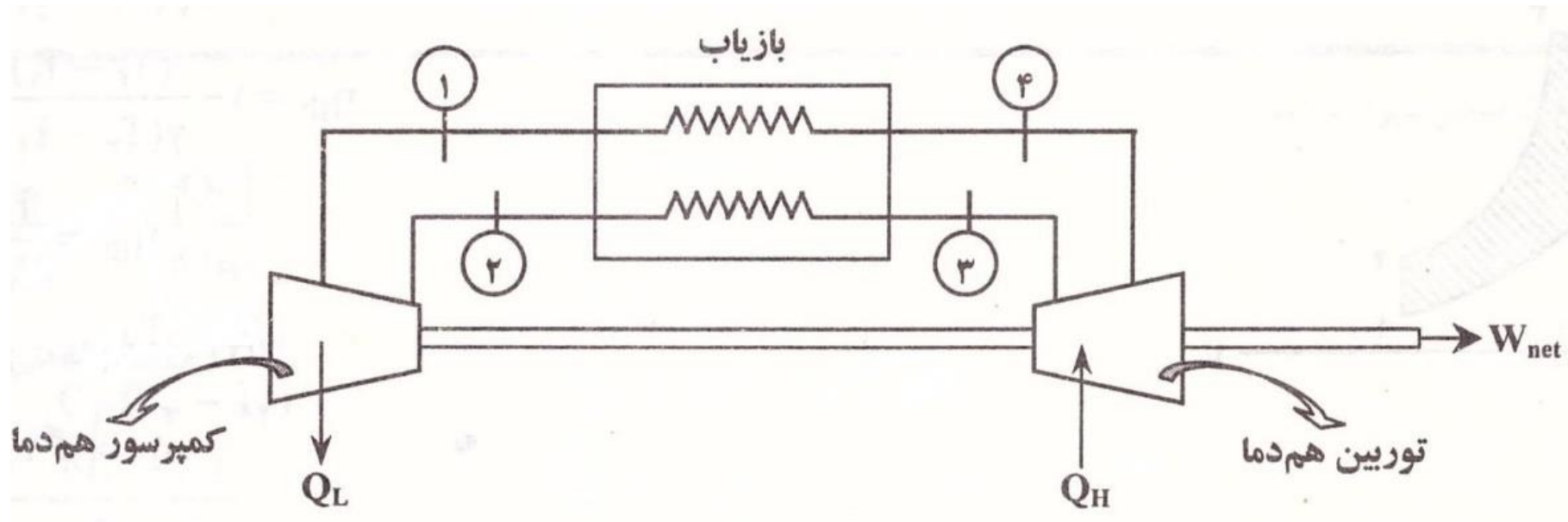
نکته: با استفاده از بازیاب می توان از این دو سیکل راندمانی بسیار نزدیک به سیکل کارنو گرفت.



شکل ۱۳-۲- سیکل استاندارد هوایی استرلینگ



شکل ۱۴-۲- سیکل استاندارد هوایی اریکسون



شکل ۱۵-۲- سیکل اریکسون با بازیاب

۱۲-۲- سیستم‌های سرمایش

در قسمت های قبل چرخه موتورهای گرمایی برای چهار فرآیند جداگانه در دستگاههای SSSF یا سیلندر پیستونی با کار در مرز جابه جا شونده بررسی شد. در چرخه های مورد بررسی سیال عامل تغییر فاز می‌داد یا به شکل تک فاز رفتار می‌کرد. سپس سیستم توانی با چهار فرآیند SSSF در نظر گرفته شد که دو فرآیند آن فشار ثابت بودند و در آنها کاری انجام نمی‌شد و دو فرآیند دیگر ادیاباتیک و آنتروپی پایا بودند و در آنها کار انجام می‌شد.

اکنون یک سیستم سرمایش ایده ال پایه را مطابق با موارد بالا در نظر می‌گیریم. تنها تفاوت در این است که در اینجا هر فرآیند عکس فرآیند همانندش در چرخه توانی است.

نکته مهم: یادآوری می‌گردد که مستقل از اینکه فرآیندهای جداگانه، SSSF یا سیلندر و پیستون با مرز جابه جا شونده باشند، کار خالص داده شده به چرخه برابر با سطح بسته خطهای فرآیند 1-2-3-4-1 است.

در بخشهای بعد بهسازی شده چرخه سرمایش ایده ال پایه را بررسی خواهیم کرد.

۱۳-۲- چرخه سرمایش تراکم بخار

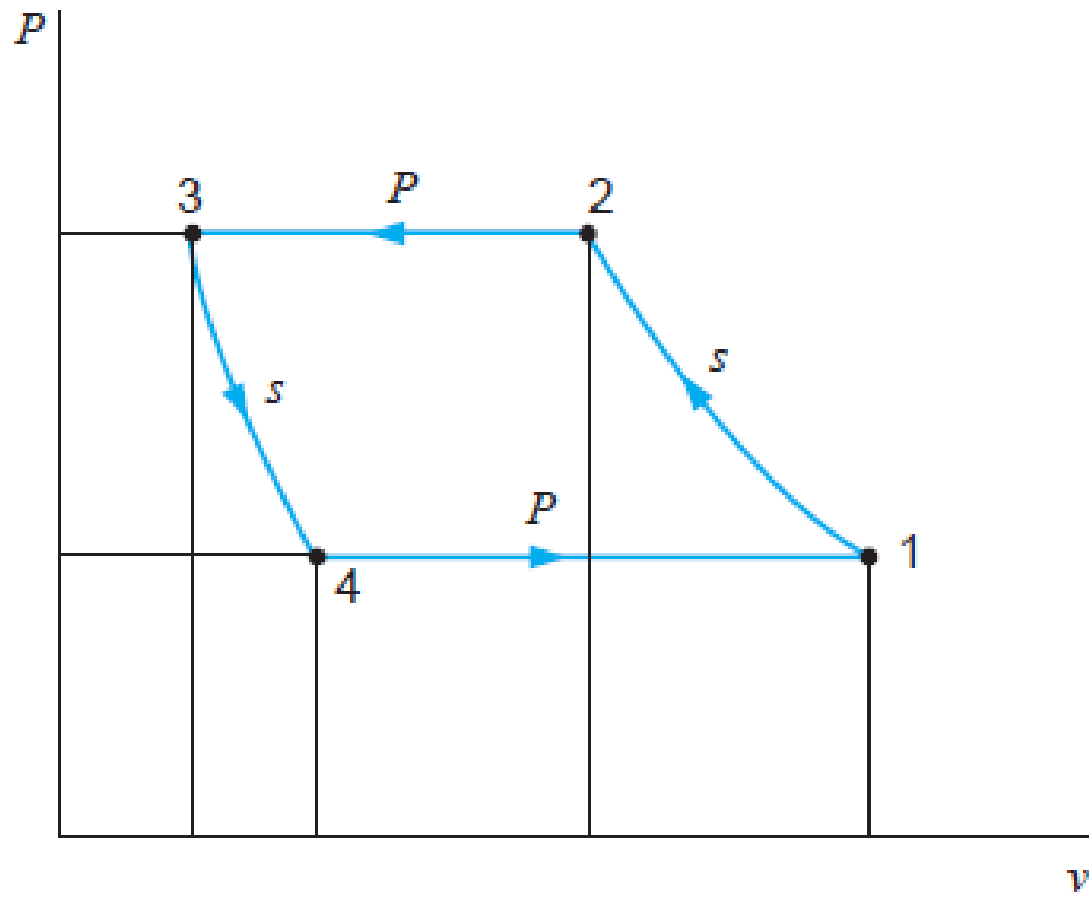
در این بخش چرخه سرمایشی بررسی می‌شود که مانند چرخه توانی رانکین سیال کاری تغییر فاز می‌دهد. در شکل ۱۵-۲ حالت 3 مایع اشباع در دمای چگالنده و حالت 1 بخار اشباع در دمای تبخیر کننده است. بنابراین فرآیند انبساط آنتروپی پایای 4-3، در ناحیه دوفازی و پرمایع است. در نتیجه از این فرآیند چنان کار کمی به دست می‌آید که این بخش از سیستم ارزش هزینه کردن ندارد. بنابراین توربین را با یک وسیله انبساط مانند شیر یا لوله کم قطر جانشین کرده تا سیال کاری از فشار بالا تا فشارپایین دچار خفگی شود. چرخه به دست آمده (شکل ۱۶-۲) الگوی ایده‌آلی برای سیستم سرمایش تراکم بخار است و شامل مراحل زیر است:

۱- بخار اشباع کم فشار وارد کمپرسور شده و فرآیند تراکم برگشت پذیر ادیاباتیک 2-1 انجام می‌شود.

۲- در فرآیند فشار ثابت 3-2 گرما دفع شده و سیال کاری به شکل مایع اشباع از چگالنده بیرون می‌رود.

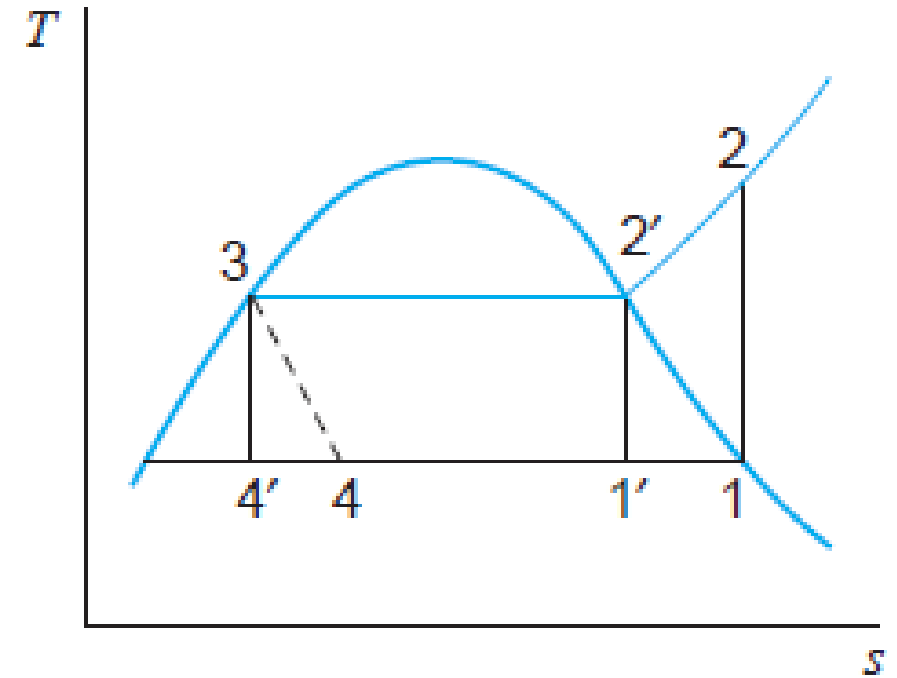
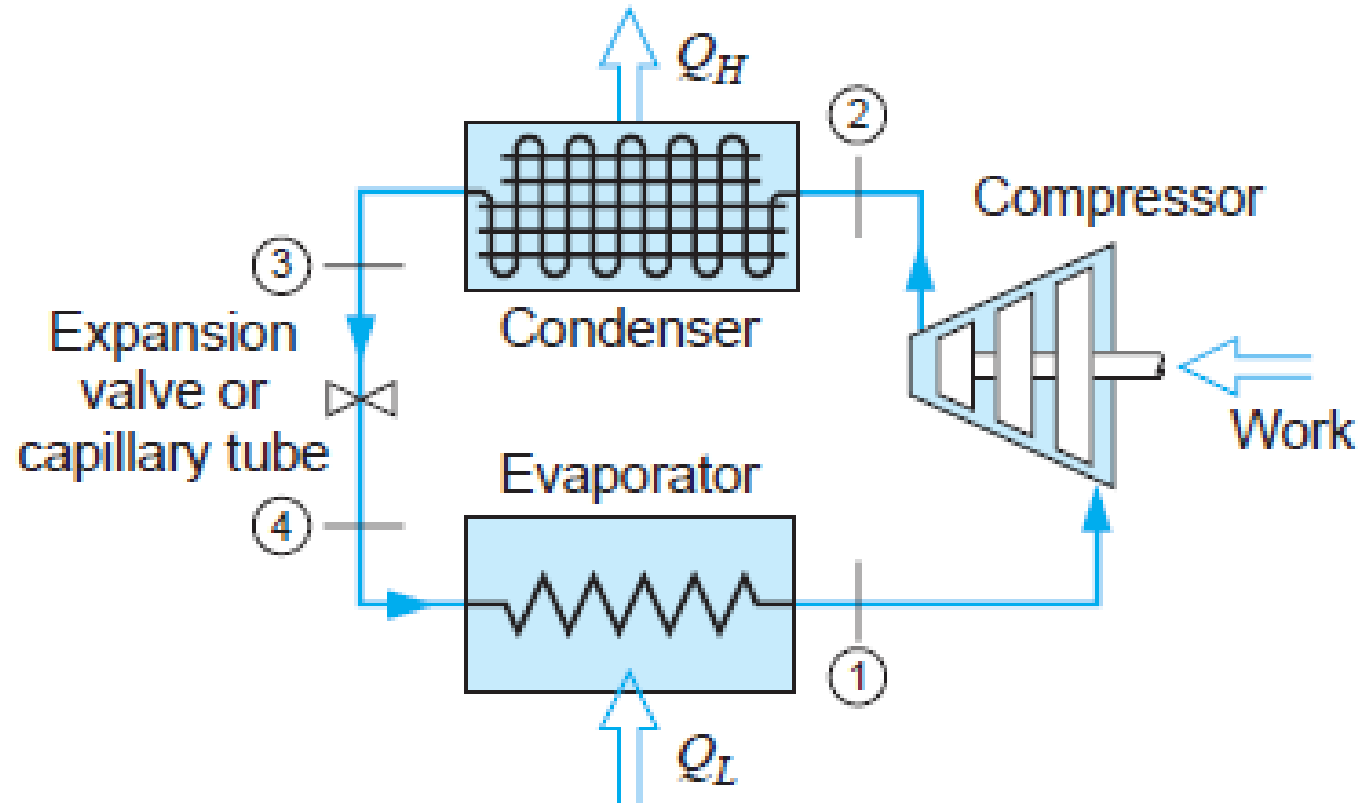
۳- فرآیند خفگی ادیاباتیک 4-3

۴- تبخیر سیال کاری در فرآیند فشار ثابت 1-4



شکل ۱۶-۲- چرخه سرمایش چهار فرآیندی

اختلاف میان این چرخه و چرخه ایده ال کارنو یعنی $1'-2'-3-4'-1'$ در این است که در چرخه کارنو سیال کاری همواره درون ناحیه دوفازی می ماند. بسیار بهتر است که کمپرسور به جای مخلوطی از بخار و مایع تنها بخار را دریافت کند، چنین نیازی در فرآیند $1'-2'$ چرخه کارنو نیز وجود داشت. در واقع متراکم کردن در حالت $1'$ با نرخ منطقی و نگهداشتن تعادل میان بخار و مایع غیر ممکن است.



شکل ۱۷-۲- چرخه سرمایش تراکم بخار ایده ال

اختلاف دیگر جانشینی فرآیند خفگی به جای توربین است که قبلا توضیح داده شد.

کاربرد های چرخه سرمایش تراکم بخار :

۱- سرمایش یک فضا تا دمایی کمتر از دمای محیط که در این حالت ضریب عملکرد برودتی به صورت زیر تعریف می گردد که در آن

Q_L گرمایی است که از فضای سرد گرفته می شود.

$$\beta = \frac{Q_L}{W_C}$$

۲- در این حالت هدف استفاده از گرمای Q_H است و به چرخه نام پمپ گرمایی اطلاق می شود. ضریب عملکرد پمپ گرمایی به صورت

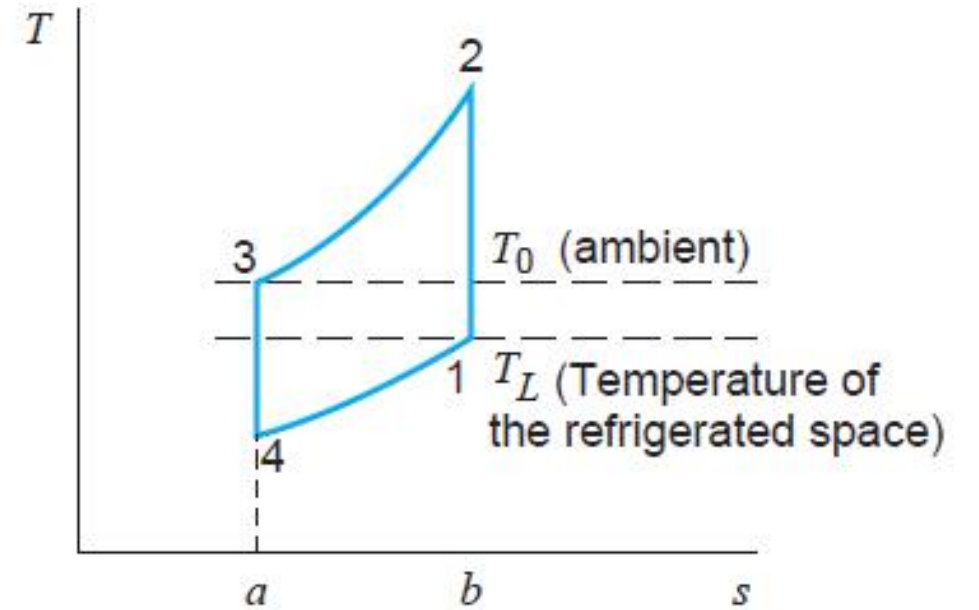
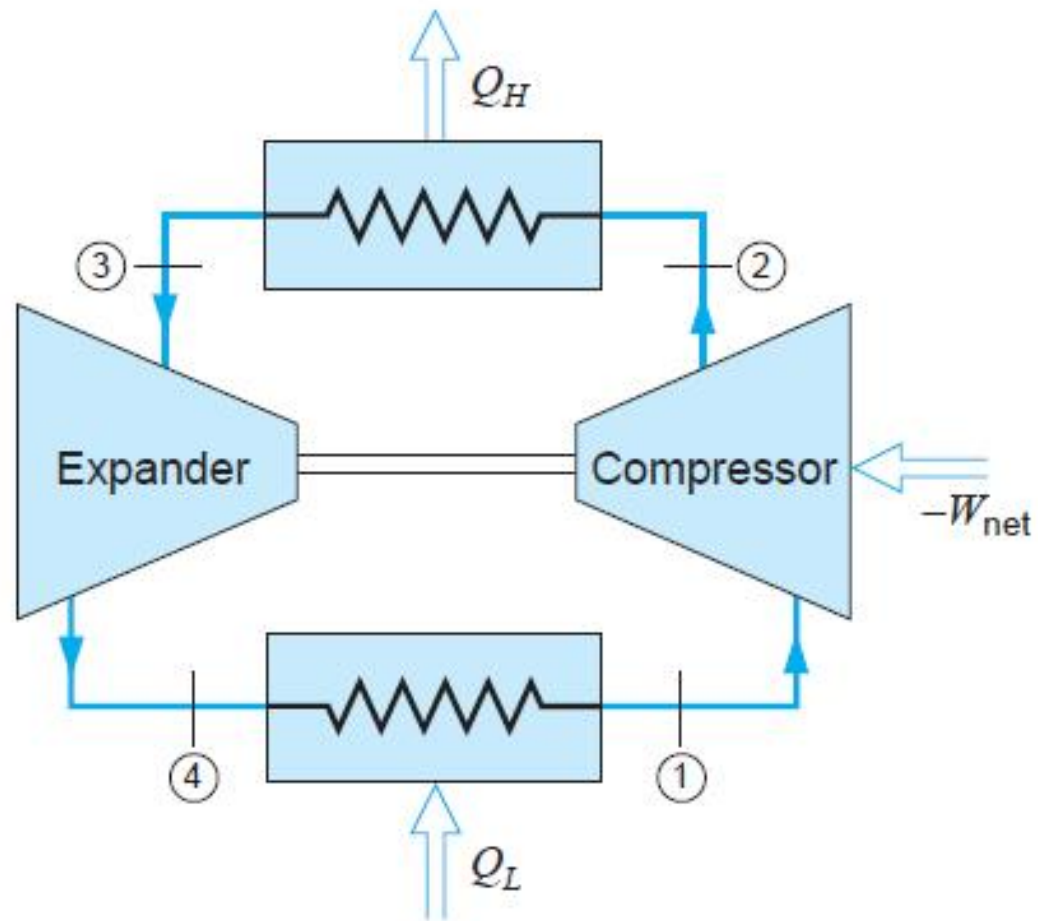
زیر تعریف می گردد.

$$\beta' = \frac{Q_H}{W_C}$$

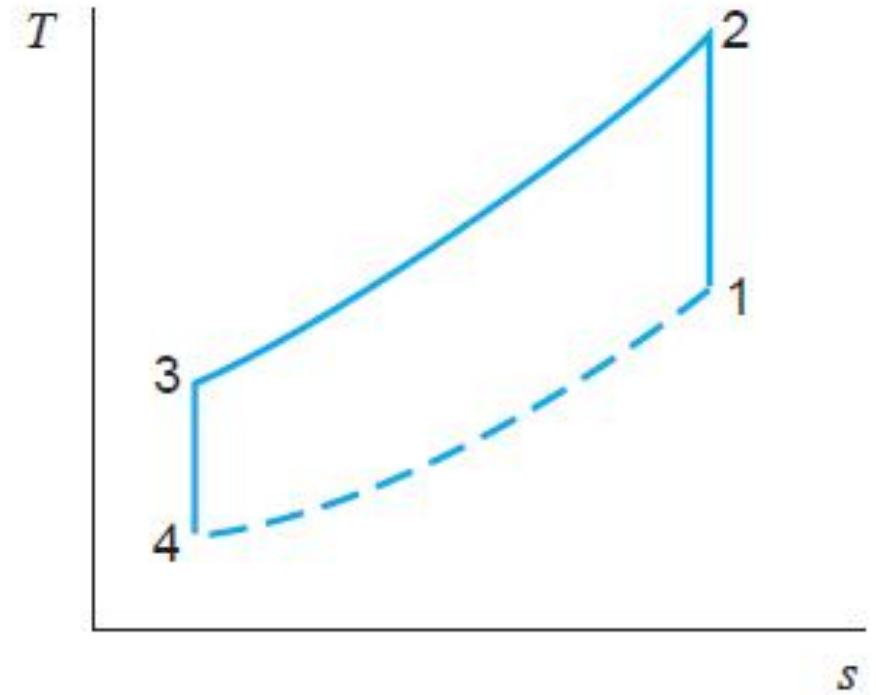
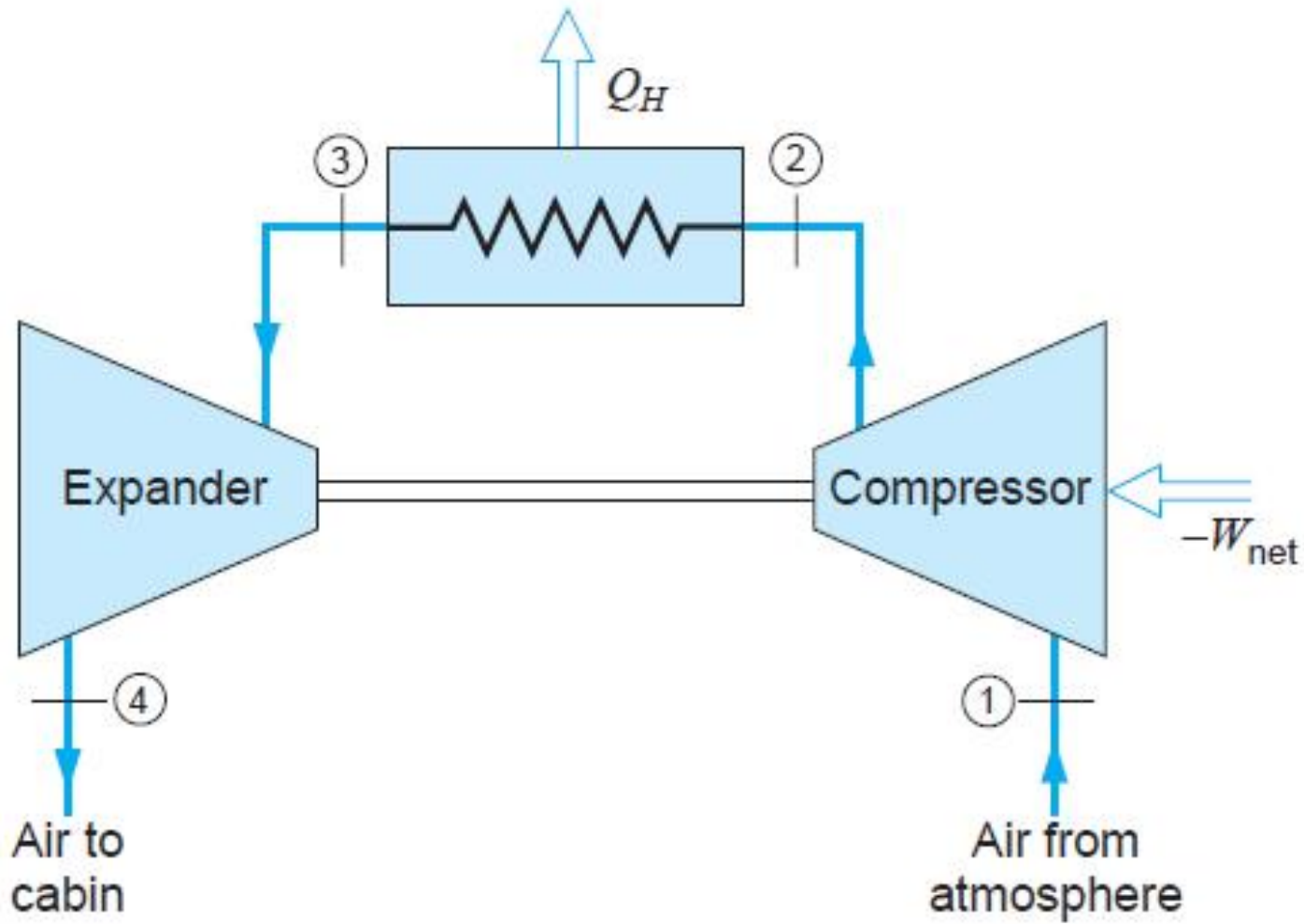
۱۳-۲- چرخه سرمایش استاندارد هوا

اگر چرخه سرمایش چهار فرآیندی ایده ال اصلی شکل ۱۵-۲ را با سیال کاری گازی در نظر بگیریم، آنگاه کار خروجی فرآیند انبساط آنتروپی ثابت همانند حالتی که سیال کاری چگالیده می‌شود، تا آن اندازه کوچک نیست که بتوانیم از آن چشم پوشی کنیم. بنابراین در چرخه سرمایش استاندارد هوای نشان داده شده در شکل ۱۷-۲ با چهار فرآیند SSSF توربین را ننگه می‌داریم. این چرخه وارون چرخه برایتون است و کاربرد آن در مایع ساختن هوا و دیگر گازها و نیز در موقعیت های ویژه ای چون سیستمهای سرمایش هواپیماهاست.

در چرخه سرمایش استاندارد هوا پس از تراکم از حالت 1 تا 2 هوا با انتقال گرما به محیطی در دمای T_0 سرد می‌شود. سپس هوا در فرآیند 3 تا 4 تا فشار ورودی کمپرسور منبسط می‌شود و در منبسط کننده، دما تا T_4 افت می‌کند. سپس می‌توان تا رسیدن به دمای T_L هوا را گرم کرد. کار این چرخه با مساحت 1-2-3-4-1 و اثر سرمایش آن با مساحت 4-1-b-a-4 نشان داده می‌شود. ضریب کارکرد نسبت این دو مساحت است. کاربرد این چرخه برای سرمایش هواپیما در یک چرخه باز است و در شکل ۱۹-۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱۸-۲- چرخه سرمایش استاندارد هوا



شکل ۱۹-۲- یک چرخه سرمایش هوا که در سرمایش هواپیما کاربرد دارد

فصل سوم:

روابط ترمودینامیکی

مقدمه: هدف این فصل معرفی روابطی است که بتوان با استفاده از خصوصیات

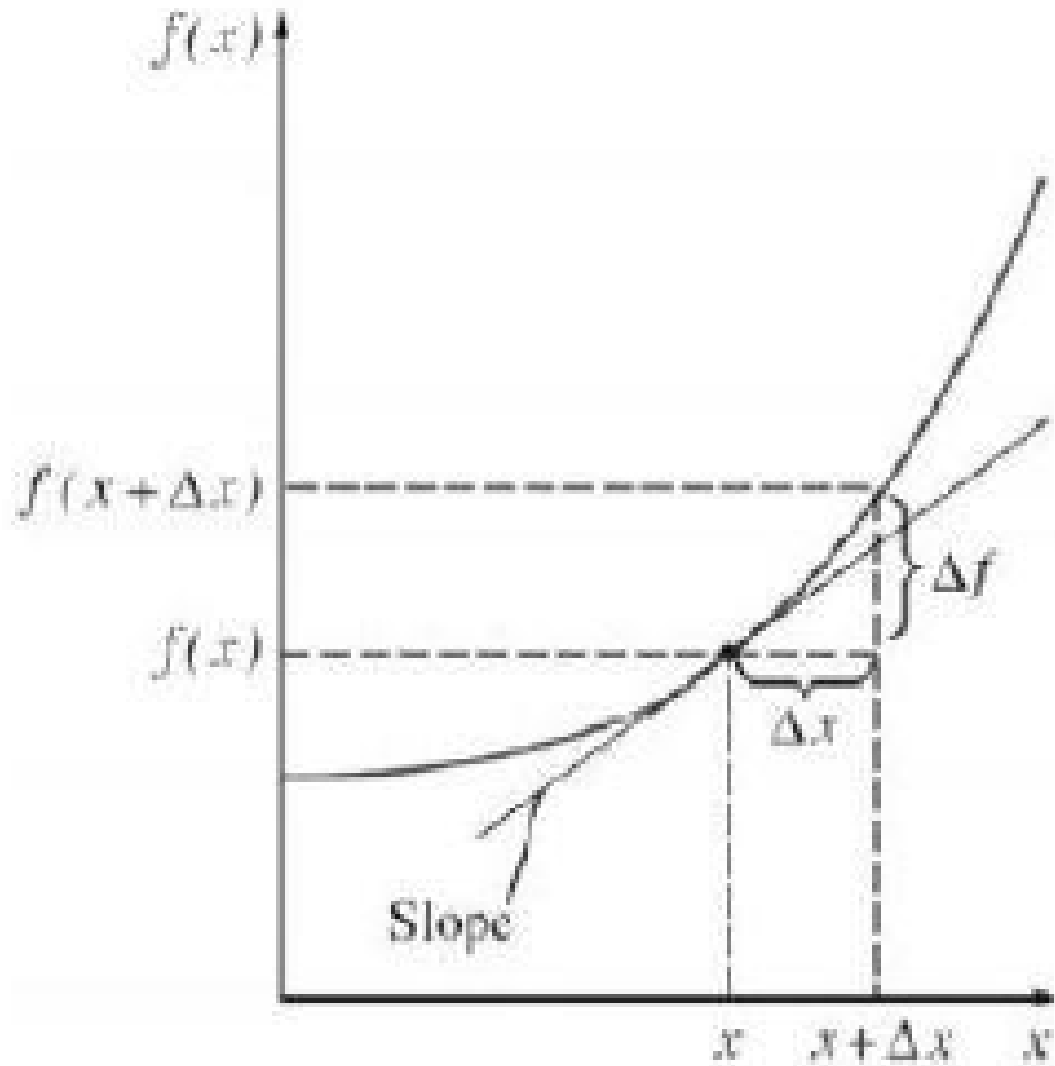
ترمودینامیکی قابل اندازه‌گیری (p, v, T) به خصوصیات دیگر ترمودینامیکی مواد از قبیل

(s, h, u) پی ببریم.

از قبل به یاد داریم که حالت ماده ساده تراکم پذیر فقط به وسیله دو خاصیت متمرکز کاملاً

مستقل مشخص می‌شود.

یادآوری از ریاضیات:



$$f = f(x)$$

$$\frac{df}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

مشتقات جزئی:

$$z = z(x, y)$$

$$dz = \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)dx + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)dy$$

$$dz = Mdx + Ndy$$

روابط دیفرانسیلی جزئی:

M و N در رابطه بالا به صورت زیر می‌باشند:

$$M = \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_y \quad N = \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_x$$

با مشتق‌گیری از M و N داریم:

$$\left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)_x = \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}\right) \quad , \quad \left(\frac{\partial N}{\partial x}\right)_y = \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}\right) \Rightarrow \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)_x = \left(\frac{\partial N}{\partial x}\right)_y$$

در نهایت به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_z \left(\frac{\partial x}{\partial z}\right)_y \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)_x = -1$$

روابط ماکسول:

معادلاتی که مشتقات جزئی خواص P, V, T, S یک سیستم تراکم پذیر ساده را به یکدیگر ربط می‌دهند، روابط ماکسول نامیده می‌شوند.

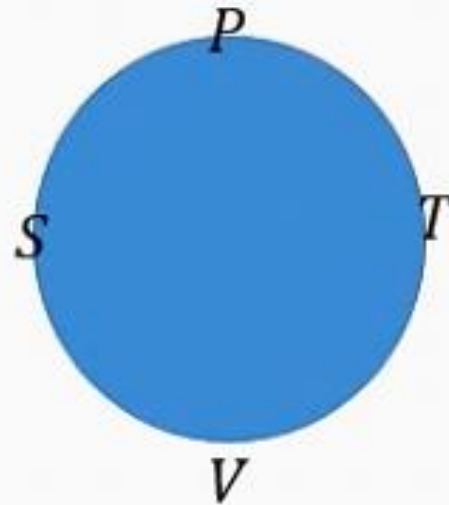
تابع گیبس و تابع هلمولتز:

$$\begin{aligned} a &= u - Ts & du &= Tds - Pdv \\ g &= h - Ts & dh &= Tds + vdP \\ & & da &= -sdT - Pdv \\ & & dg &= -sdT + vdP \end{aligned}$$

روابط ماکسول:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_s = -\left(\frac{\partial P}{\partial s}\right)_v$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v$$



$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_s = \left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)_P$$

$$\left(\frac{\partial s}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$$

رابطه کلاپیرون:

معادله کلاپیرون، تغییر آنتالپی ناشی از تغییر فاز را تعیین می‌کند. می‌دانیم که در زمان تغییر فاز فشار فقط تابعی از دماست. بنابراین با استفاده از رابطه سوم ماکسول به نتیجه زیر می‌رسیم:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v = \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T \longrightarrow \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{sat} = \frac{S_{fg}}{v_{fg}}$$

نکته ۱: رابطه کلاپیرون برای هر تغییر فازی که در فشار و دمای ثابت اتفاق می‌افتد معتبر است.

نکته ۲: معادله کلاپیرون را برای تغییر فازهای بخار-مایع و بخار-جامد نیز می‌توان در نظر گرفت که با در

نظر گرفتن بخار به عنوان گاز ایده‌ال و انتگرال‌گیری داریم:

در ادامه داریم:

$$\left. \begin{array}{l} dh = Tds + vdP \\ dP = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow dh = Tds$$

$$\left. \begin{array}{l} h_{fg} = Ts_{fg} \\ \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{sat} = \frac{s_{fg}}{v_{fg}} \end{array} \right\} \Rightarrow \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{sat} = \frac{h_{fg}}{Tv_{fg}}$$

تغییرات انرژی داخلی:

تغییرات انرژی داخلی را تابعی از T و v فرض می‌کنیم:

$$u = u(T, v)$$

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T dv$$

$$du = C_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T dv$$

پس از انجام عملیات ریاضی به فرمول زیر می‌رسیم:

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_v dT + \int_{v_1}^{v_2} \left[\left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right) \right]_v - P \right] dv$$

تغییرات آنتروپی:

روابط کلی برای dh دقیقا مانند du به دست می آید:

انتالپی را تابعی از T و p فرض می کنیم:

$$h = h(T, P)$$

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T dP$$

$$dh = C_P dT + \left(\frac{\partial h}{\partial P}\right)_T dP$$

پس از انجام عملیات ریاضی به دو فرمول مهم زیر می‌رسیم:

رابطه اول:

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_v}{T} dT + \int_{v_1}^{v_2} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v dv$$

رابطه دوم:

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_P}{T} dT - \int_{P_1}^{P_2} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dP$$

فصل چہارم:

سوخت و احتراق

تعاریف اولیه:

- هر ماده ای که در حین سوختن انرژی آزاد کند، سوخت نامیده می شود.
- اکثر سوخت های شناخته شده شامل هیدروژن و کربن هستند که سوخت های هیدروکربنی نامیده می شوند. (به عنوان مثال زغال سنگ، بنزین، گاز طبیعی)
- اکثر سوخت های هیدروکربنی مایع مخلوطی از تعدادی هیدروکربن هستند که از نفت خام به وسیله تقطیر در برج تقطیر به دست می آیند.

➤ احتراق: یک واکنش شیمیایی که طی آن سوخت اکسید می‌شود و مقادیر زیادی انرژی آزاد می‌شود، احتراق نام دارد.

➤ به دلیل فراوانی هوای آزاد، در اغلب فرآیندهای احتراق هوا به عنوان اکسید کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

➤ در موارد خاص باید از اکسیژن به عنوان اکسید کننده استفاده نمود.

ترکیبات هوا:

هوای خشک از ۲۰/۹۰٪ اکسیژن، ۷۸/۱۰٪ نیتروژن، ۰/۹٪ آرگون

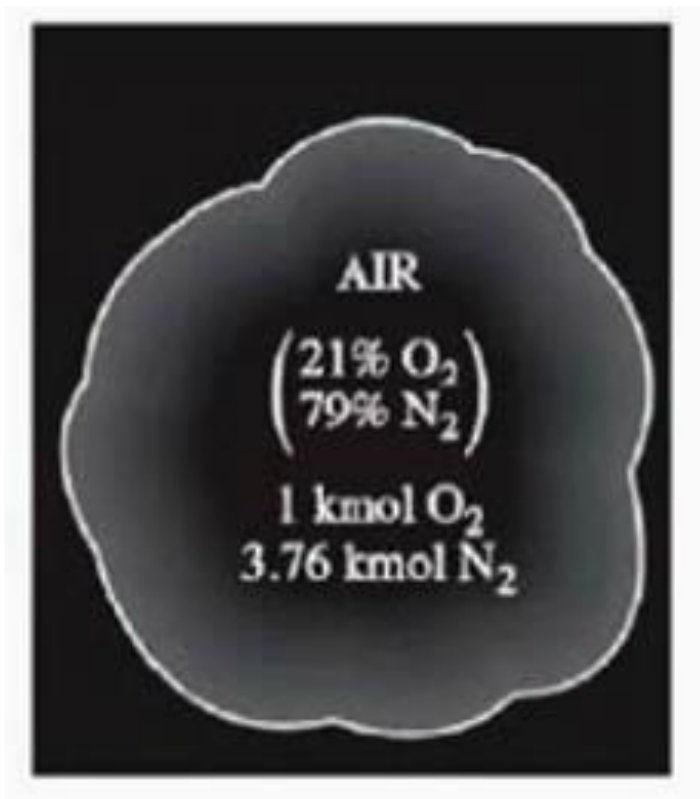
و مقادیر کمی دی اکسید کربن، هلیوم، نئون و هیدروژن تشکیل

شده است. در تحلیل هوای خشک، ۲۱ درصد مولی اکسیژن و

۷۹ درصد مولی نیتروژن در نظر گرفته می شود. بنابراین همراه هر

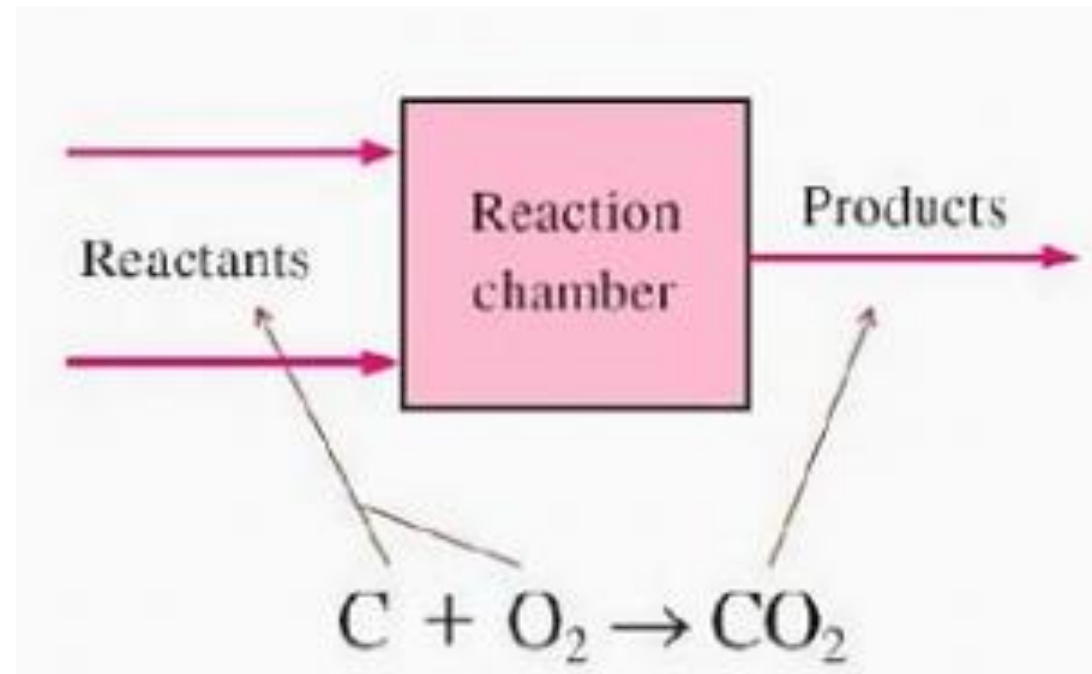
مول اکسیژن هوا در فرآیندهای احتراق، ۳/۷۶ مول نیتروژن وجود

خواهد داشت.



فرآیند احتراق:

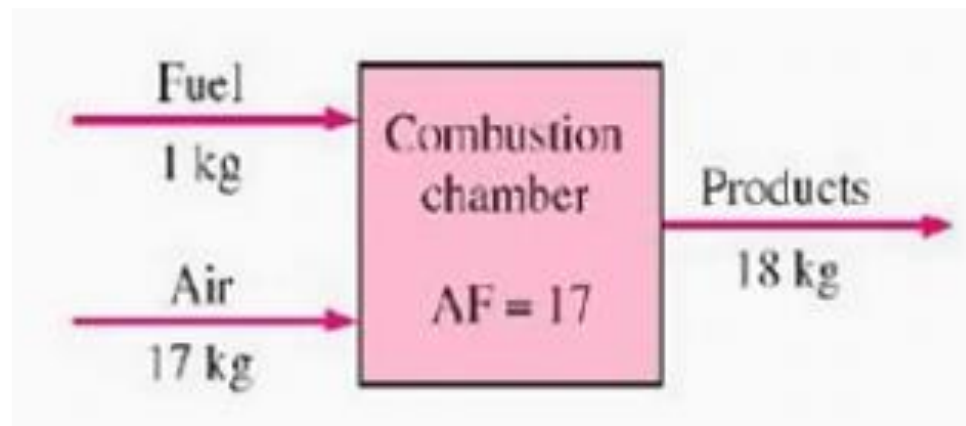
در طی یک فرآیند احتراق، اجزایی که قبل از واکنش وجود دارند، واکنش گرها و اجزایی که بعد از واکنش به وجود می آیند، محصولات نامیده می شود.



نسبت هوا به سوخت:

- نسبت هوا به سوخت معمولاً بر اساس جرم بیان می‌شود و به صورت نسبت جرم هوا به جرم سوخت در طی فرآیند احتراق تعریف می‌شود.
- نسبت هوا به سوخت همچنین بر مبنای مولی به صورت نسبت تعداد مول‌های هوا به تعداد مول‌های سوخت تعریف می‌شود.

$$AF = \frac{m_{air}}{m_{fuel}}$$



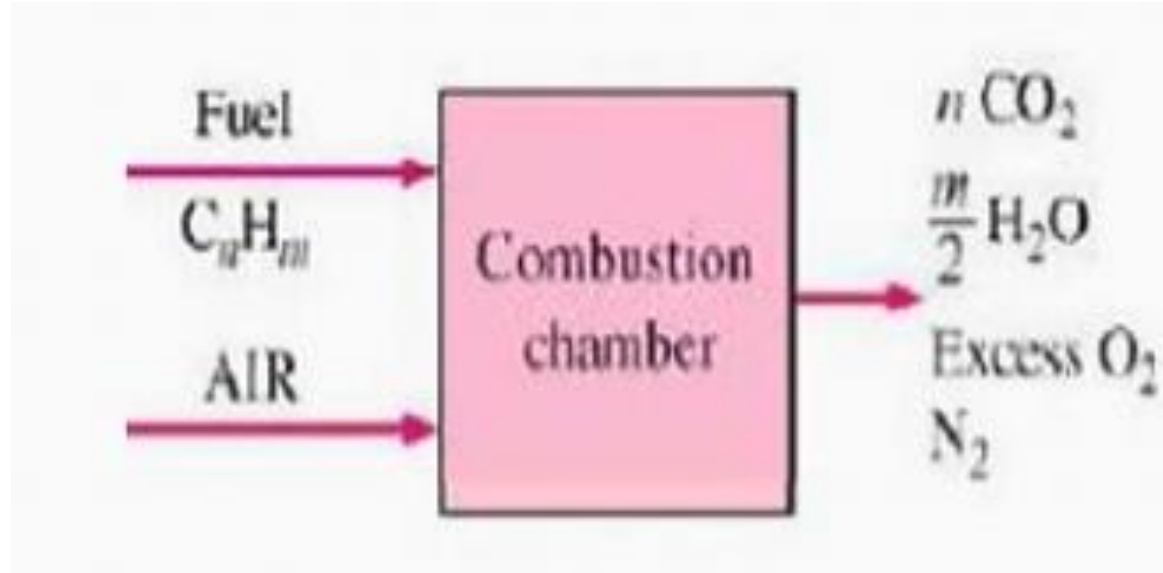
احتراق نظری و واقعی:

- هرگاه تمام اجزاء قابل احتراق سوخت در یک فرآیند احتراق به طور کامل بسوزند، فرآیند احتراق کامل است.

- متقابلاً هرگاه محصولات احتراق شامل مقداری سوخت نسوخته و با اجزایی مثل CO، C، H، OH باشند، فرآیند احتراق ناقص است.

- کافی نبودن اکسیژن، عدم اختلاط مناسب در محفظه احتراق و پدیده گسستگی از دلایل بروز احتراق ناقص می باشد.

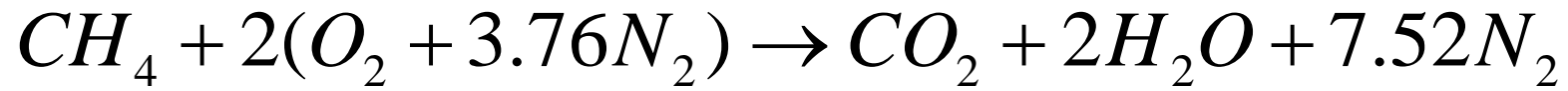
• احتراق کامل در شکل زیر نمایش داده شده است:



• کمترین میزان هوای مورد نیاز برای احتراق کامل یک سوخت، هوای نظری یا استوکیومتری نامیده می‌شود.

• فرآیند احتراق که در آن سوخت به طور کامل با هوای نظری می‌سوزد، احتراق نظری یا استوکیومتری آن سوخت نامیده می‌شود.

• احتراق استوکیومتریک متان



• در صورتی که هوای موجود بیش از هوای نظری باشد، میزان هوای مازاد به صورت درصد

هوای اضافی بیان می‌شود.

• مقدار هوای کمتر از هوای نظری، کمبود هوا نامیده می‌شود و اغلب به صورت درصد

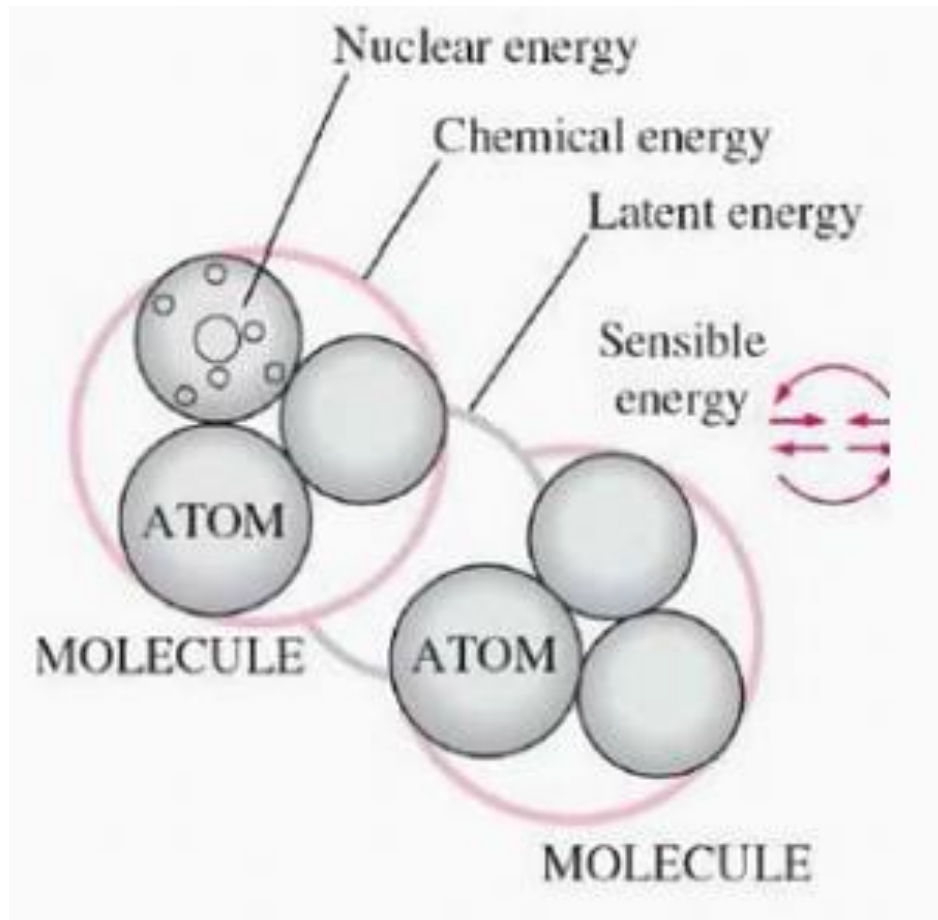
کمبود هوا بیان می‌شود.

• در صورتی که فرآیند احتراق کامل فرض شود، با استفاده از اصل بقای جرم می‌توان

ترکیبات محصولات را بدست آورد.

انرژی مولکول های ماده:

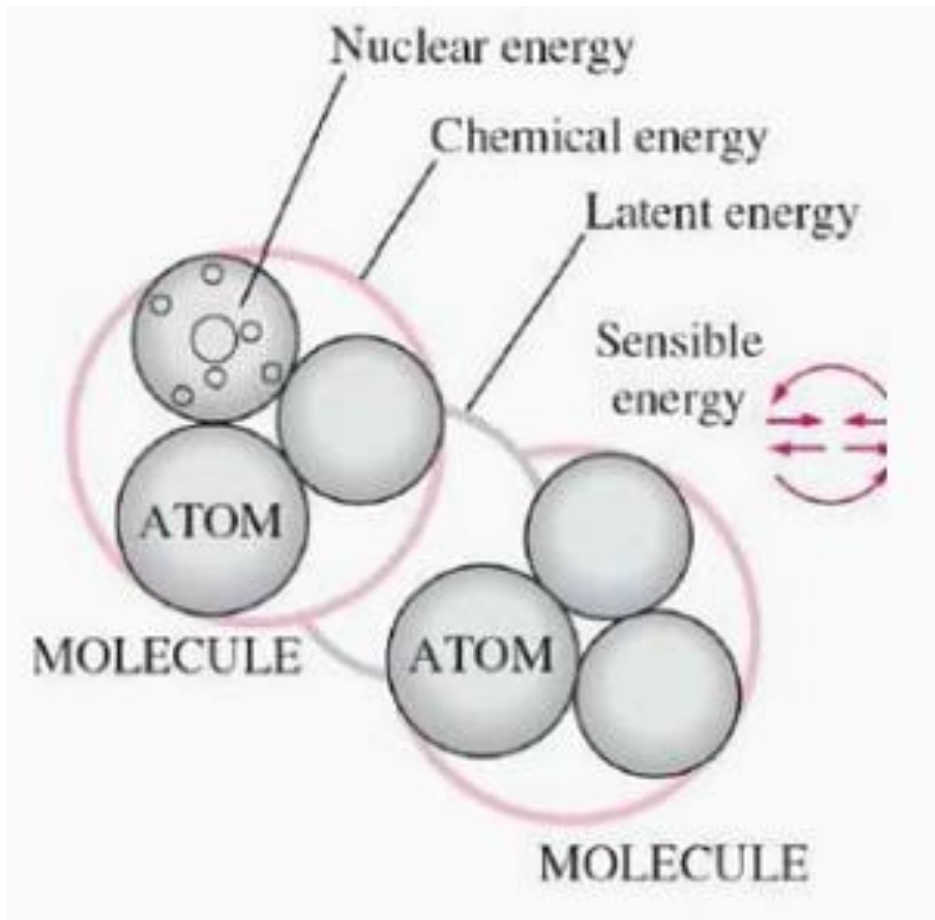
اشکال مختلف انرژی موجود در مولکول های یک سیستم عبارتند از:



- انرژی محسوس
- انرژی نهان
- انرژی شیمیایی
- انرژی هسته ای

انرژی مولکول های ماده:

اشکال مختلف انرژی موجود در مولکول های یک سیستم عبارتند از:



- انرژی محسوس
- انرژی نهان
- انرژی شیمیایی
- انرژی هسته ای

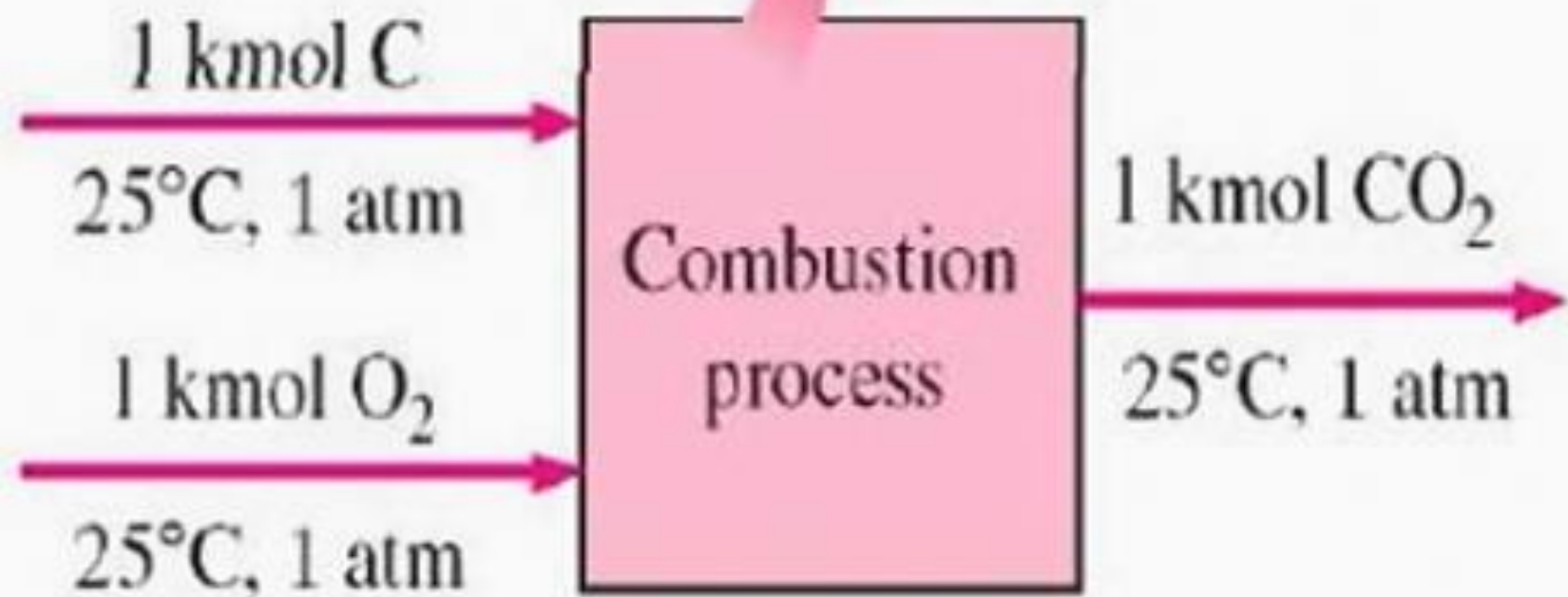
آنتالپی واکنش و آنتالپی احتراق:

• میزان انتقال گرما در یک واکنش شیمیایی بدون انجام کار، آنتالپی واکنش نامیده می‌شود و به صورت اختلاف بین آنتالپی محصولات و آنتالپی واکنشگرها می‌باشد.

• برای فرآیندهای احتراق معمولاً آنتالپی واکنش، آنتالپی احتراق نامیده می‌شود.

$$h_R = h_c = H_{prod} - H_{reac}$$

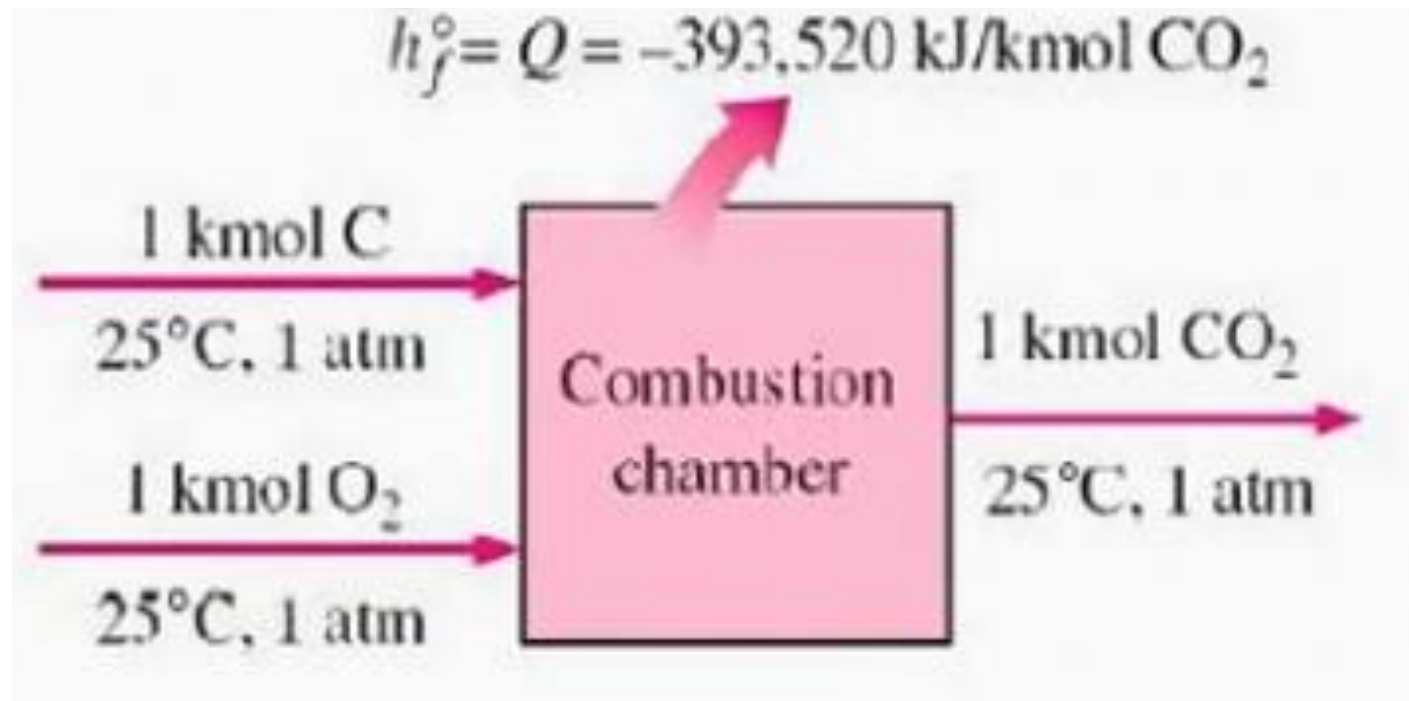
$$\bar{h}_C = Q = -393,520 \text{ kJ/kmol C}$$



آنتالپی تشکیل:

• آنتالپی واکنش تشکیل یک ماده از عناصر تشکیل دهنده اش را آنتالپی تشکیل آن ماده مینامند.

نکته: برای تمام عناصر پایدار آنتالپی تشکیل صفر است.



ارزش حرارتی:

- مقدار انرژی آزاد شده وقتی که یک سوخت به طور کامل در طی یک فرآیند جریان ثابت میسوزد و محصولات به حالت مواد واکنشگر باز میگردند، ارزش حرارتی سوخت نامیده می شود.

$$|h_c| = \text{Haeting value}$$

- در صورتی که در محصولات احتراق آب به صورت مایع باشد، ارزش حرارتی بالاتر و در صورتی که آب به صورت بخار باشد، ارزش حرارتی پایین تر نامیده می شود و داریم:

$$HHV = LHV + (Mh_{fg})$$

تحلیل قانون اول برای سیستم های واکنشی :

• برای نوشتن موازنه انرژی نیاز به دانستن آنتالپی اجزای ماده می باشد. آنتالپی یک ماده

مرکب به صورت زیر نمایش داده می شود:

$$Enthalpy = \bar{h}_f^o + (\bar{h} - \bar{h}^o)$$

• در رابطه بالا $(\bar{h} - \bar{h}^o)$ آنتالپی محسوس نسبت به حالت استاندارد است.

تحلیل قانون اول برای سیستم های واکنشی جریان پایدار :

• بقای انرژی برای یک سیستم واکنش شیمیایی جریان پایدار:

$$Q - W = \sum N_P (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_P = \sum N_r (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r$$

• برای واکنشی که آنتالپی احتراق در دسترس میباشد داریم:

$$Q - W = \bar{h}_c^\circ + \sum N_P (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_P - \sum N_P (\bar{h} - \bar{h}^\circ)_r$$

تحلیل قانون اول برای سیستم های واکنشی - سیستم بسته:

• بقای انرژی برای یک سیستم بسته شیمیایی :

$$(Q_{in} - Q_{out}) + (W_{in} - W_{out}) = U_{prod} - U_{react}$$

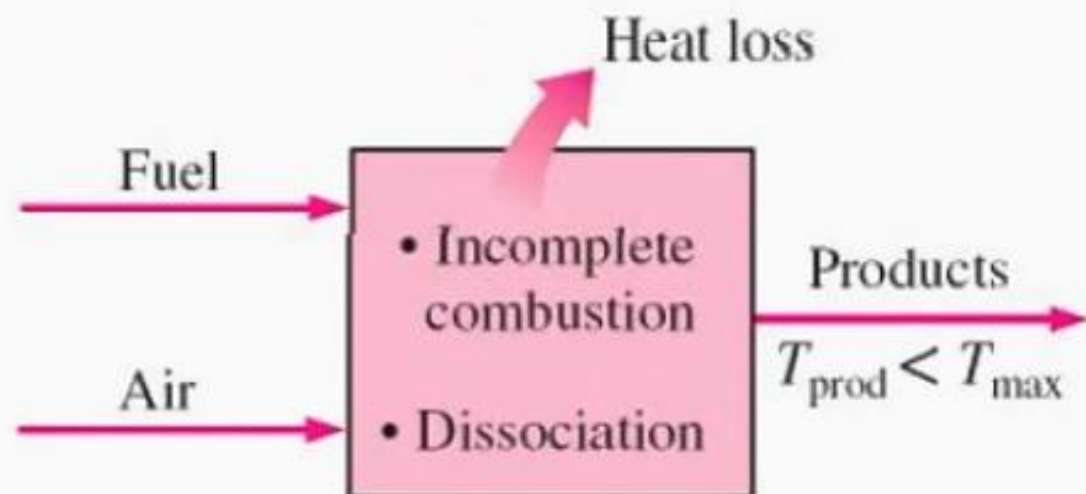
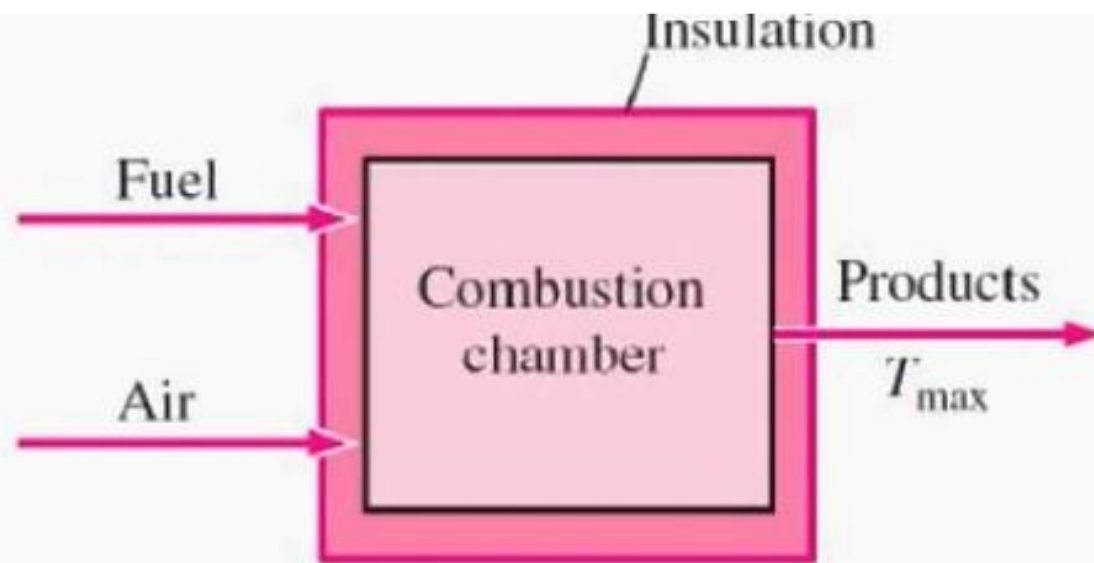
$$U = H - PV$$

$$Q - W = \sum N_P (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o - P\bar{V})_P = \sum N_r (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o - P\bar{V})_r$$

دمای شعله آدیاباتیک:

- در حالتی که هیچ اتلاف گرمایی به محیط اطراف وجود نداشته باشد، دمای محصولات به یک مقدار ماکزیمم خواهد رسید که دمای شعله آدیاباتیک یا دمای احتراق آدیاباتیک واکنش نامیده می شود.

$$Q = 0 \quad \text{and} \quad W = 0 \quad \Rightarrow \quad H_{heat} = H_{react}$$
$$\sum N_P (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_P = \sum N_r (\bar{h}_f^o + \bar{h} - \bar{h}^o)_r$$



تغییر آنتروپی سیستم های واکنشی:

• تعادل آنتروپی برای یک سیستم واکنشی بسته یا جریان پایدار:

$$\sum \frac{Q_K}{T_K} + S_{gen} = S_{prod} - S_{react}$$

• اصل افزایش آنتروپی:

$$S_{gen,adiabatic} = S_{prod} - S_{react}$$